

國科會國防科技發展方案學術合作協調小組研究計畫

計畫名稱：微超音波製造系統研究

結案報告

計畫編號：NSC-90-2623-7-032-001

執行期間：90 年 1 月 1 日至 90 年 12 月 31 日

計畫主持人：趙崇禮

共同主持人：林隆湧、馬廣仁

執行機構：淡江大學機械系

合作單位：中山科學研究院二十二廠

中 華 民 國 九 十 一 年 一 月 二 十 三 日

## 誌 謝

感謝國科會及中科院第二研究所之經費補助及全力支持，使本研究計畫得以順利進行。同時對中科院二所二十二廠之林隆湧廠長，簡學斌副廠長，黃榮祥博士及陳志章先生於研究過程中所給與的協助及於檢討會議中提供之寶貴建議及指正謹此致上最誠摯的謝意。

## 目 錄

誌謝	1
目錄	2
圖錄	4
表錄	6
1. 前言 .....	7
2. 超音波加工 .....	12
2.1 超音波加工加工原理.....	12
2.1.1 前言.....	12
2.1.2 超音波的特性.....	17
2.1.3 超音波加工的基本原理.....	19
2.1.4 超音波加工的特點.....	20
2.1.5 超音波加工設備及其組成.....	21
2.1.6 超音波加工的基本參數.....	29
2.2 超音波加工切削理論.....	33
2.3 超音波加工加工實驗.....	38
2.3.1 實驗流程.....	38

2.3.2 實驗儀具及加工材料.....	39
2.3.3 超音波加工加工實驗加工參數.....	45
2.4 超音波加工研究方法.....	46
3. 結果與討論.....	49
3.1 前言.....	49
3.2 超音波加工參數.....	50
3.3 實驗結果.....	52
3.3.1 磨粒大小對超音波加工結果的影響... ..	52
3.3.2 粗細磨粒間的關係.....	56
3.3.3 磨粒軟硬對超音波加工結果的影響.....	56
3.3.4 磨料濃度對超音波加工結果的影響.....	56
3.3.5 刀具磨耗對超音波加工結果的影響.....	57
3.3.6 工件形狀結構對超音波加工結果的影響... ..	57
3.3.7 加工速率對超音波加工結果的影響.....	58
3.4 複合加工.....	61
3.5 超音波加工三維結構.....	64
4. 結論.....	71
5. 重要參考文獻.....	74

## 圖 錄

圖 1.1. 以準分子雷射加工玻璃時於不同能量密度對加工幾何形狀的影.....	9
圖 1.2. 以準分子雷射加工玻璃時不同脈衝頻率對加工後表面殘留物之影響 2.4J/cm <sup>2</sup> .....	9
圖 1.3. 以超音波加工 Zerodur 時不同加工條件所得之表面特徵 .....	10
圖 2.1 (自由磨粒)超音波加工—UM .....	12
圖 2.2 旋轉式(固定磨粒)超音波加工--RUM .....	13
圖 2.3 刀具震動會使刀具上或刀具與工件間之懸浮液中的磨粒以高速衝擊工件	14
圖 2.4 配合以工件低頻震動之旋轉式超音波加工 .....	15
圖 2.5 超音波加工造成之切屑可經由工件低頻震動間歇加大刀具與工件間間隙 而得以有效的排出 .....	16
圖 2.6 彈性杆內質點振動狀況 .....	19
圖 2.7 常見變幅杆截面變化形式.....	25
圖 2.8 超音波加工實驗流程.....	39
圖 2.9 微超音波加工機.....	42
圖 2.10 微超音波變幅杆 .....	42
圖 2.11 微超音波加工刀具設計圖 .....	44
圖 3.1、微壓痕周邊之裂痕.....	50
圖 3.2、加工機制與磨粒粒徑關係之示意圖.....	51
圖 3.3 磨粒大小與表面粗度的關係 .....	53
圖 3.4. 經 60 $\mu$ m 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	53
圖 3.5. 經 60 $\mu$ m 的碳化矽磨粒加工後表面邊緣的微裂.....	54
圖 3.6. 經 5 $\mu$ m 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	54
圖 3.7. 經 2 $\mu$ m 的碳化矽磨粒加工過後的表面情況 .....	55

圖 3.8. 經 $2\mu\text{m}$ 的碳化矽磨粒加工過後表面邊緣的微裂 .....	55
圖 3.9. 凹面結構的工件 .....	58
圖 3.10. 凸面結構的工件 .....	58
圖 3.11. 施加荷重過大，造成工件表面破裂 .....	58
圖 3.12. 複合加工之表面形貌的結構 .....	60
圖 3.13. 因定位不準造成結構斷裂 .....	60
圖 3.14. $5\mu\text{m}$ 磨粒加工時造成表面邊角處較大的微破裂 .....	62
圖 3.15. $2\mu\text{m}$ 磨粒加工時表面邊角處較輕微的微破裂 .....	62
圖 3.16. 氣泡的形成與內爆示意圖 .....	63
圖 3.17. 配合複合加工方式加工出的工件表面顯微圖片 .....	66
圖 3.18 本研究加工出三維造型的工件 .....	67
圖 3.19 .超音波加工出之三維結構細部放大顯微圖片 .....	68
圖 3.20 多道次超音波加工中加工表面之改進情形顯微圖片 .....	70

## 表 錄

表 2.1 超音波加工實驗加工參數 .....	45
-------------------------	----

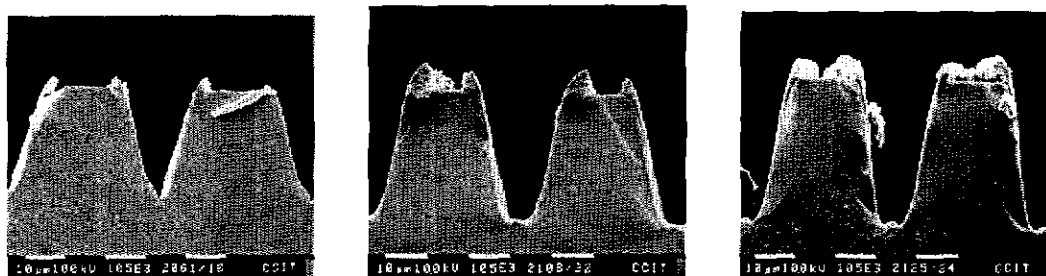
## 1. 前言

玻璃及陶瓷等材料一般被歸類為"脆性材料"。因為當這些材料承受應力時，在還沒有產生明顯之塑性變形前脆裂破壞便已發生。雖然這種高脆度(Brittleness)使得加工這些材料變得極為困難，但對由這些脆性材料製成之高精度零件的需求卻與日俱增；只因為他們擁有許多現代及未來科技運用所需之優良的物理、電子、光或機械特性。近年來由於航太工業的急速發展，對於光電元件的需求也極為迫切。對於航太工業中，導航系統的精密度佔有絕對之影響力，尤其是雷射陀螺儀的製程與發展更是如此。然而雷射陀螺儀本身所要求之精度關係到其材料的選擇、加工方式的特殊要求。在材料上所要求的是不受環境、溫度影響及具有優良的物理、電子、光及機械特性。而符合這類要求的材料常是脆性材料。對於這些脆性材料製成之高精度零件的需求的與日遽增，只因為他們擁有許多現代及未來科技運用所需的機械特性。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之蓬勃發展而增加。而雷射陀螺儀正是要求在硬度 VHN1000 以上，常溫接近零膨脹係數的玻璃陶瓷 Zerodur 進行鑽深而口徑小且尺寸精度高的鑽孔加工。

鑑於我國近年來光電科技發展迅速，工業界尤其是國防工業對系統之精度要求也日漸嚴苛；繼續朝著精、薄、短、小、準之目標邁進。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之進步發展而增加。

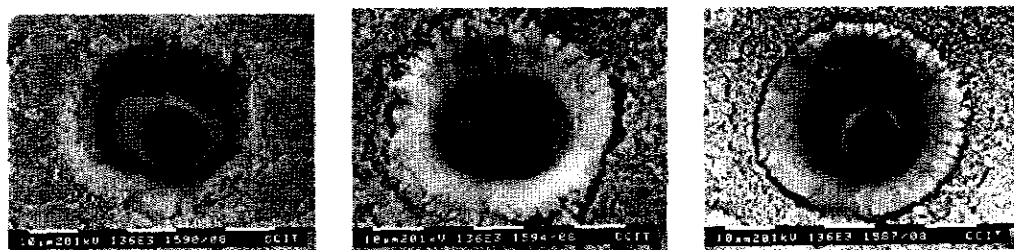


而在脆性材料上進行微孔加工的方法雖然有蝕刻法、雷射加工、微放電加工法(MEDM-micro EDM)及微超音波加工法(Micro ultrasonic machining, MUSM)；但前三種加工法多僅使用於孔深與孔徑比較小的情況。當需要在脆性材料上鑽深孔(孔深與孔徑比較大)時，若以雷射加工除因焦距景深及小孔效應造成之孔側壁斜角(tapping angle)外因熱效應引發之加工區材質改變、表面微裂(micro-cracks)(圖1.1)及四散於表面之表面殘留物(圖1.2)均使工件之尺寸精度及表面品質難於提升。若以蝕刻法難以避免孔側壁斜角的問題而微放電加工則受限於被加工材料之導電性。目前以微超音波加工在脆性材料上鑽深孔時所受之限制最少且結果亦很好(圖1.3)；故被採用的也最多。微超音波加工亦為目前適用於微機電系統(MEMS)製造方法中唯一非熱、非化學及非電的加工方法，所以對傳統的微細加工法，相對於微放電加工，LIGA和準分子雷射鑽孔的限制，微超音波加工法可說是有最大的應用彈性。若能將微超音波加工系統整合其他為細加工法，如微細放電加工法，則對多層的MENS應用，如微應力感測器，微傳動元件感微光電元件等，會有進一步實現量產的可能性。然而，國內對微超音波鑽孔加工之相關研究非常缺乏。國外之研究單位(如德國IPT、日本JAE、蘇俄AI等)雖積極在進行研究，但是其研究結果尤其是詳細之加工參數部份對外發表的並不多。故積極研究提升我國超音波鑽孔加工之相關技術實屬當務之急。



1.4J/cm<sup>2</sup> (5Hz/200shots)    2.1J/cm<sup>2</sup> (5Hz/200shots)    2.4J/cm<sup>2</sup>  
(5Hz/200shots)

圖 1.1. 以準分子雷射加工玻璃時於不同能量密度對加工幾何形狀的影響

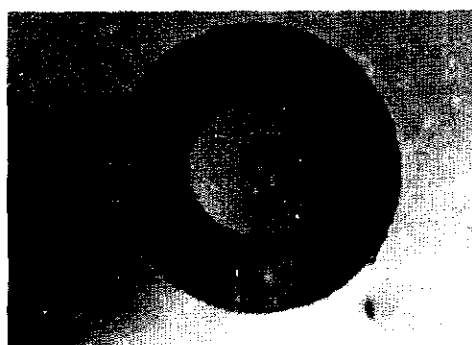


10Hz

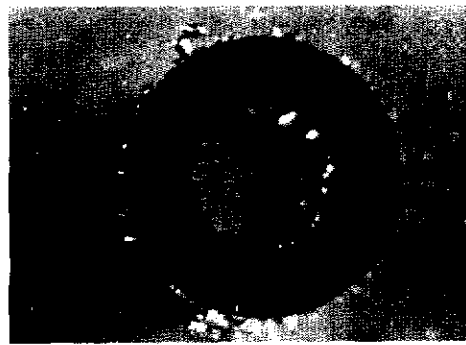
5Hz

2Hz

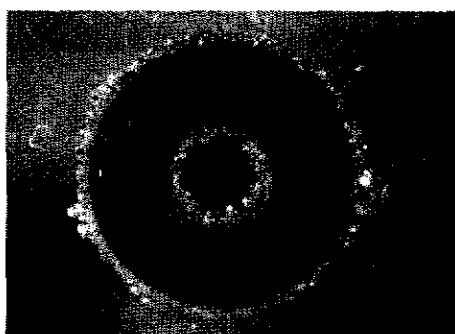
圖 1.2. 以準分子雷射加工玻璃時不同脈衝頻率對加工後表面殘留物之影響 2.4J/cm<sup>2</sup>



(a)



(b)



(c)



(d)

圖 1.3. 以超音波加工 Zerodur 時不同加工條件所得之表面特徵(a) #800, power percentage: 10%, feedrate: 0.8mm/min (b) #800, power percentage: 20%, feedrate: 0.8mm/min (c) #200, power percentage: 20%, feedrate: 0.8mm/min (d) #200, power percentage: 30%, feedrate: 0.8mm/min

微超音波加工( Micro ultrasonic machining, MUSM )是目前適用於微機電系統( Microelectro-mechanical system, MEMS )製造方法中唯一非熱( non-thermal )、非化學( non-chemical )及非電( non-electrical )的加工方法，所以對傳統的微細加工法，如：微放電加工( micro-EDM )，LIGA和準分子雷射鑽孔的限制，微超音波加工法可說是有最大的應用彈性。然而，國內對超音波鑽孔加工之相關研究並不多。鑑於我國近年來光電科技發展迅速，工業界尤其是國防工業對系統之精度要求也日漸嚴苛；繼續朝著精、薄、短、小、準之目標邁進。而光電系統中要求在脆性材料上鑽深而小且尺寸精度高的孔的機會也會隨光電科技之蓬勃發展而增加。故積極研究提升我國超音波鑽孔加工之相關技術實屬當務之急。

本計畫之目的在研究以微超音波加工法加工石英玻璃、

Zerodur、矽單晶等脆性材料時，工件之各項幾何尺寸精度及刀具磨耗與加工參數如進給率(feedrate)、粒度(grit size)、切削液等間之關係。材料之變形機構、加工表面及次表面之顯微組織變化、加工表面及次表面之破壞模式亦將探討以奠定日後在 2-D 和 3-D 形狀 MEMS 加工的基礎。

此外對超音波加工機之各項精度誤差對工件之各項幾何尺寸精度可能造成之影響進行分析。進而由分析所得數據對超音波加工機欲進行精密之微超音波加工時所必須改進之部份提出概念設計。而在第二年之計畫中則將對概念設計之微超音波加工機進行實體細部設計、製作及加工測試並於第三年之計畫中配合微精密平台之研製及刀具設計以進行 3D 之 MEMS 加工。

## 2. 超音波加工

### 2.1 超音波加工原理

#### 2.1.1 前言

超音波加工(ultrasonic machining)是以超音波震動輔助磨粒(abrasive)進行切削之加工過程。以使用磨粒之方式，超音波加工可分為自由磨粒(一般簡稱超音波加工-UM/USM, ultrasonic machining)(見圖2.1)及固定磨粒(即迴轉式超音波加工 -- RUM, rotary ultrasonic machining))(見圖2.2)兩大類。

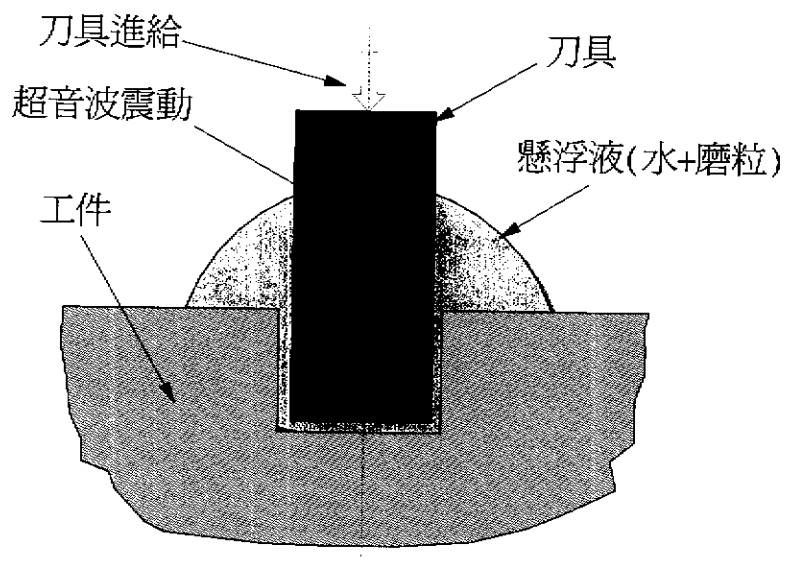


圖2.1 (自由磨粒)超音波加工—UM

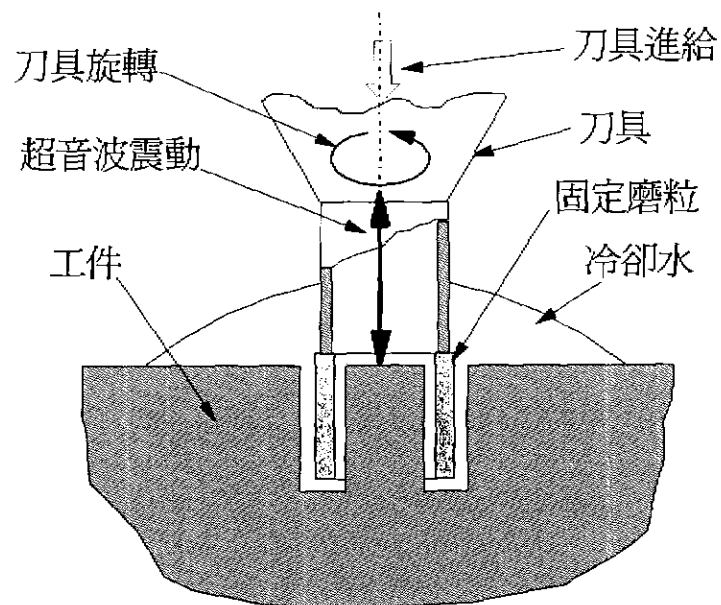


圖 2.2 旋轉式(固定磨粒)超音波加工--RUM

由於超音波加工時刀具以16-25kHz之頻率0.0125-0.075mm 之振幅震動；而刀具震動會使刀具上(固定磨粒超音波加工)或刀具與工件間(自由磨粒超音波加工)之懸浮液(slurry, 水及磨粒之混合液)中的磨粒以高速衝擊工件。由於磨粒的體積很小，其與工件之接觸面積亦很小導致很高的接觸壓力(見圖2.3)。由高速及高接觸壓力造成很高之衝擊應力，致使工件(脆性材料)表面形成微碎屑(micro-chipping)而達成材料去除之目的。

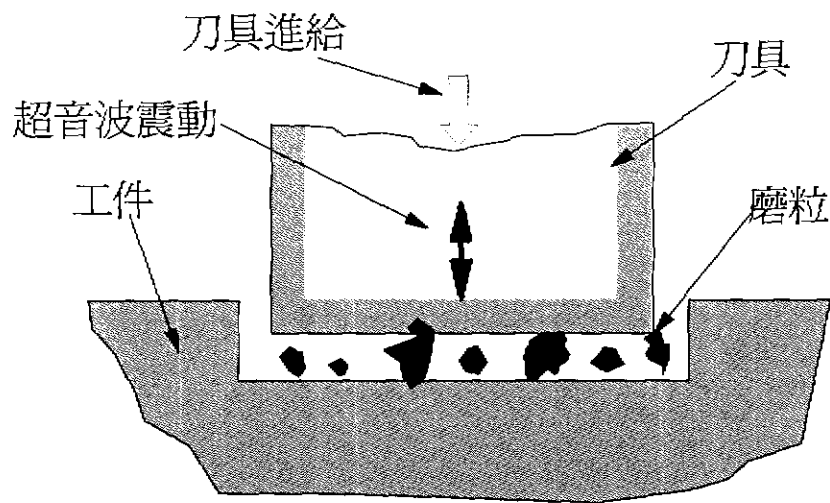


圖2.3 刀具震動會使刀具上或刀具與工件間之懸浮液中的磨粒以高速衝擊工件

迴轉式超音波加工(RUM, rotary ultrasonic machining) 屬固定磨粒式超音波加工，其磨輪除了在進給方向有超音波振動外磨輪主軸亦同時以高速旋轉。其原理係將振動子安裝於迴轉主軸上，加工磨輪一面迴轉一面隨超音波之頻率對工件進行振擊磨削加工，其加工時無須再使用游離磨料僅利用管型工具之空心心部連續提供冷卻液，除冷卻工具因振動所產生之熱外，並可快速帶走切屑。由於除超音波加工外，還伴隨磨輪切削作用（固定切削）因而切削效率較高，此其優點。然除鑽圓孔、攻牙、銑直槽外，無法做較複雜形狀加工則為其短處。此一技術目前不但常用於做脆性材料之鑽孔加工也可運用於超精密模具生產(Moriwaki & Shamoto 1993, 1995)。

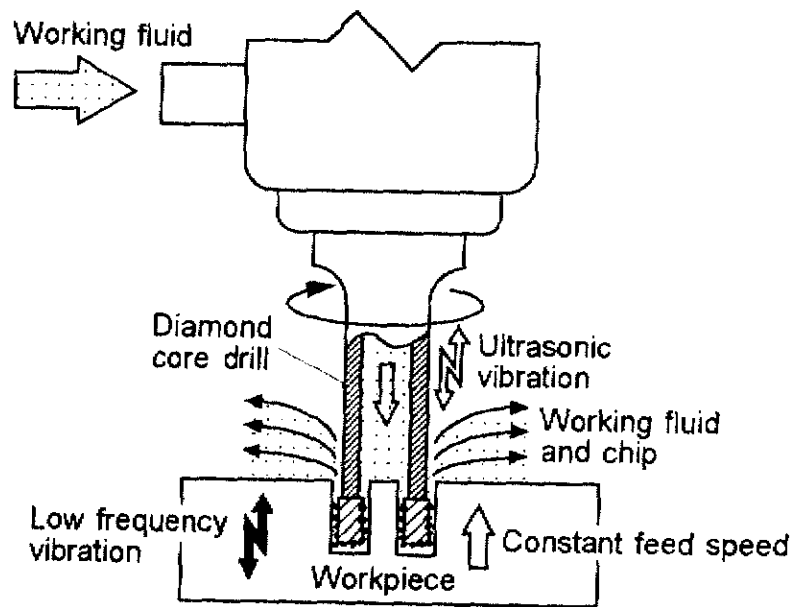


圖2.4 配合以工件低頻震動之旋轉式超音波加工 (Ishikawa et al 1998)

此外近來亦有於旋轉式超音波加工之振動外配合以工件低頻之震動(圖2.4)，如此可將因超音波加工造成之切屑經由工件低頻震動間歇加大刀具與工件間間隙而得以有效的排出(圖2.5)；不至於被困於加工之孔底容易重複掉入刀具與工件間而造成加工深度之突然加大同時使工件上之裂痕及表面粗糙度均變差。



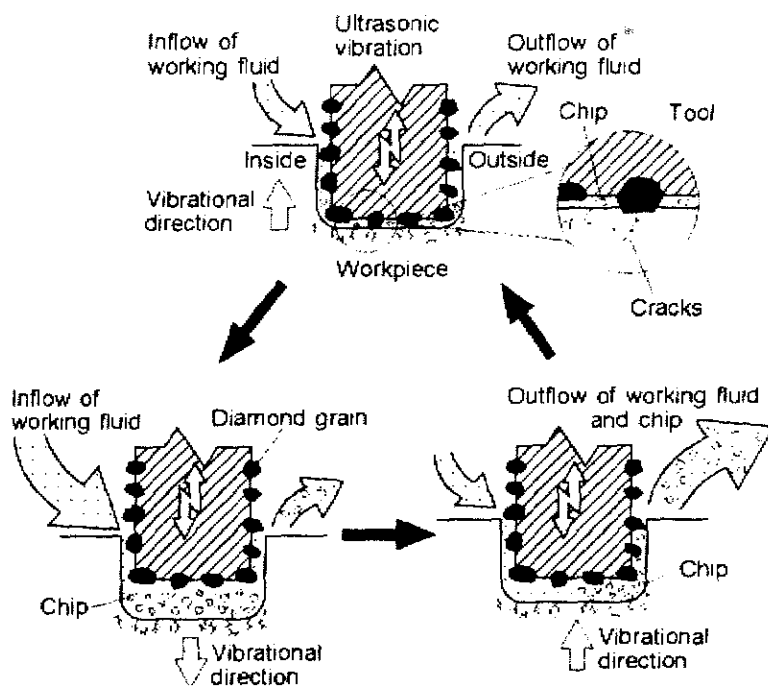


圖2.5 超音波加工造成之切屑可經由工件低頻震動間歇加大刀

具與工件間間隙而得以有效的排出(Ishikawa et al 1998)

相較於無工件低頻震動之旋轉式超音波加工之加工孔徑精度，有附工件低頻震動之旋轉式超音波加工一般較差但其孔徑較一致。無工件低頻震動之旋轉式超音波加工中，孔入口處之加工孔徑會隨孔之加深而變大；使其呈現一推拔孔。亦即，無工件低頻震動之旋轉式超音波加工鑽出之細長孔其平均孔徑較有附工件低頻震動之旋轉式超音波加工鑽出之細長孔來得好；但是其鑽出細長孔之孔徑一致性較差。

### 2.1.2 超音波的特性

聲波是人耳能感受到的一種縱波，其頻率範圍為 16—16kHz。當聲波的頻率低於 16Hz 時就叫做次聲波，高於 16kHz 則稱為超音波。具有如下特性：

- 1) 超音波可在氣體、液體和固體介質中傳播，其傳播速度與頻率、

波長、介質密度等有關，可用公式表示

$$C=\lambda f \quad (1-1)$$

式中  $C$ --超音波傳播速度 (m/s)； $\lambda$ --波長 (m)； $f$ --頻率 (Hz)。

- 2) 超音波在各種介質中傳播，其運動軌跡都按餘弦函數規律變化，

其位移為

$$x=A \cos (\omega t+\psi) \quad (1-2)$$

式中  $x$ --質點運動的位移 (m)； $A$ --振幅 (m)； $\omega$ --角速度 (rad/s)；

$t$ --時間 (s)； $\psi$ --振動的相位角 (rad)。

- 3) 超音波可傳遞很強的能量其能量強度可用垂直於波的傳播方向單

位面積的能量來表示，超音波加工中的能量強度高達幾百瓦／平

方厘米，且 90%作用於工件表面。

4) 超音波會產生反射、干涉和共振現象，出現波的疊加作用，使彈性杆中某處質點始終不動，而某處質點的振幅則大大增加，從而獲得更大的超音波加工能量（圖 2.6）。這是因為，超音波在同一彈性杆的一端向另一端傳播時，在不同介質的介面上會產生一次或多次波的反射，結果在有限長彈性杆，將存在若干個周期相同、振幅相等、傳播方向相同或相反的波。於是在彈性杆傳播的波會出現波疊加，致使某處振動始終加強，或某處振動始終減弱，產生波的干涉現象。如  $t=T/4$  或  $3T/4$  的情況是當彈性杆的長度恰為半波長的整數倍，且相位相同時，便會出現波的干涉而產生振幅增加的駐波，即波共振現象。而  $t=0$ 、 $T/2$  和  $T$  的情況，則是相位相反時出現的干涉現象，使疊加後的振幅為零，不產生振動。由上述分析可知，為了提高超音波加工生產效率，必須使彈性杆處於最大振幅的共振狀態，其設計長度為半波的整數倍，杆的支點選在振動過程中的不動點，即波節點上；而杆的工作端部應選在最大振幅的波腹處。

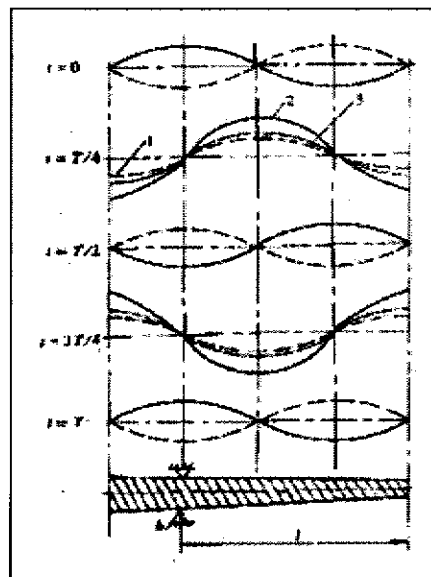


圖 2.6 彈性杆內質點振動狀況 1--反射波,2--合成波,3--入射波,b--波節  
點, l--波節點至波反射端的距離

5) 超音波在液體介質中傳播時，可在界面上產生強烈的衝擊和空蝕現象，強化了加工過程的進行，因超音波通過懸浮磨粒的液體介質時，會使液體介質連續地產生壓縮和稀疏區域，由於壓力差而形成氣體的空腔，並隨著稀疏區的擴展而增大，內部壓力下降，與此同時，受周圍液體壓力及磨粒傳遞的沖擊力作用，又使氣體空腔壓縮而提高壓力，於是，轉入壓縮區狀態時，迫使其破裂產生衝擊波。由於進行的時間極短，因此，會產生更大的衝擊力作用於工件表面，從而加速磨粒的切蝕過程。

### 2.1.3 超音波加工的基本原理:

超音波加工時，高頻電源連接超音波換能器，由此將電振盪轉換為同一頻率、垂直於工件表面的超音波機械振動，其振幅僅0.005~0.01mm，再經變幅杆放大至0.05~0.1mm，以驅動工具端面作超音波振動。此時，磨料懸浮液（磨料、水或煤油等）在工具的超音波振動和一定壓力下，高速不停地衝擊懸浮液中的磨粒，並作用於加工區，使該處材料變形，直至擊碎成微粒和粉末。同時，由於磨料學浮液的不斷攪動，促使磨料高速拋磨工件表面，又由於超音波振動產生的空化現象，在工件表面形成液體空腔，促使混合液滲入工件材料的縫隙裡，而空腔的瞬時閉合產生強烈的液壓衝擊，強化了機械拋磨工件材料的作用，並有利於加工區磨料懸浮液的均勻攪拌和加工產物的排除。隨著磨料懸浮液不斷地循環。磨粒的不斷更新。加工產物的不斷排除，實現了超音波加工的目的。總之，超音波加工是磨料懸浮液中的磨粒，在超音波振動下的沖擊、拋磨和空蝕現象綜合切蝕作用的結果。其中，以磨粒不斷衝擊為主。由此可見，脆硬的材料，受衝擊作用愈容易被破壞，故尤其適於超音波加工。

#### 2.1.4 超音波加工的特點

- 1) 適合加工各種硬脆材料，尤其是玻璃、陶瓷、寶石、石英、鍺、矽、石墨等不導電的非金屬材料。也可加工淬火鋼、硬質合金、不銹鋼、鈦合金等硬質或耐熱導電的金屬材料，但加工效率較低。
- 2) 由於去除工件材料主要依靠磨粒瞬時局部的衝擊作用，故工件表面的宏觀切削力很小，切削應力、切削熱更小，不會產生變形及燒傷，表面粗糙度也較低，可達  $Ra0.63 \sim 0.08\mu m$ ，尺寸精度可達正負  $0.03mm$ ，也適於加工薄壁、窄縫、低剛度零件。
- 3) 工具可用較軟的材料、做成較複雜的形狀，且不需要工具和工件作比較複雜的相對運動，便可加工各種複雜的型腔和型面。一般，超音波加工機床的結構比較簡單，操作、維修也比較方便。
- 4) 超音波加工的面積不夠大，而且工具頭磨損較大，故生產率較低。

### 2.1.5 超音波加工設備及其組成

超音波加工設備的功率和結構有所不同，但其基本組成相同。一般包括超音波發生器。超音波振動系統、磨料懸浮液循環系統和機床。其主要組成有：

#### 1). 超音波發生器

超音波發生器（又叫超音波振頻發生器或超音波電源）的作用是将交流電轉換為功率為  $20 \sim 4000W$  的超音頻振盪，以供給工具端面往復振動和去除工件材料的能量。

超音波發生器的電路由振盪級、電壓放大級、功率放大級及電源組成。其可以是他激式，也可以是自動跟蹤式。後者是一種自激振盪推動多級放大的功率發生器。自激頻率取決於超音波振動系統的共振頻率。當出於某種原因，如更換工具或工具頭磨損、部件受熱或壓力變化等，會引起超音波振動系統共振頻率的變化，可通過“聲回饋”或“電回饋”使超音波發生器的工作頻率能自動跟蹤變化，保證超音波振動系統始終處於良好的諧振狀態。為此，一般要求超音波發生器應滿足如下條件：

1. 輸出阻抗與相應的超音波振動系統輸入阻抗匹配
2. 頻率調節範圍應與超音波振動系統頻率變化範圍相適應，並連續可調
3. 輸出功率層可能具有較大的連續可調範圍，以適應不同工件的加工
4. 結構簡單、工作可靠、效率高，便於操作和維修。

## 2) 超音波振動系統

超音波振動系統主要包括換能器、變幅杆、工具。其作用是將由超音波發生器輸出的高頻電信號轉變為機械振動能，並通過變幅杆使工具端面作小振幅的高頻振動，以進行超音波加工。

### 1. 換能器

換能器的作用是將高頻電振盪轉換成機械振動。目前，根據其轉換原理的不同，有磁致伸縮式和壓電式兩種。

磁致伸縮式換能器：磁致伸縮效應是指，鐵、鈷、鎳及其合金；

或鐵氧體等材料的長度可隨所處磁場強度的變化而伸縮的現象。鎳在磁場中的最大縮短量為其長度的 0.004%，鐵和鈷則在磁場中為伸長，當磁消失後又恢復原有尺寸。這種材料的棒杆在交變磁場中，長度將突變伸縮，端面將交變振動。

為了減少高頻渦流損耗，超音波加工中常用純鎳片疊成封閉磁路的鎳棒換能器，即鎳磁致伸縮式換能器。其機械強度較高、輸出功率較大，常用於中功率和大功率的超音波加工。不足的是鎳片的渦流發熱損失較大，能量轉換效率較低，加工過程中需用風或水冷卻，否則隨著溫度的升高，磁致伸縮效應變小甚至消失，也可能將線圈繞組的絕緣材料燒壞。如果輸入磁致伸縮換能器線圈中的電流是交流正弦波形，那麼每一周波的正半波和負半波將引起磁場兩次大小變化，使換能器也伸縮兩次，出現“信頻”現象。信頻現象使振動節奏模糊，並使共振長度變短，對結構和使用均不利。為了避免這種信頻現象，常在換能器的交流勵磁電路中引入一個直流電源，疊加一個直流分量，使之成為泳動直流勵磁電流，或並聯一個直流勵磁繞組，加一恒定的直流磁場。鎳棒長度應等於超音波半波長或其整部數，使之處於共振狀態。

此外，因鐵氧體材料的磁致伸縮效應做成的鐵氧體磁致伸縮換能器，其電聲效率高，但機械強度低、單位面積輻射功率小，一般用於功率較小的超音波加工。

壓電效應超音波換能器：壓電效應是指，石英晶體、鈦酸鋇以及鉻鈦酸鉛等物質在受到機械壓縮或拉伸變形時，在其兩端面上產生一定的電荷而形成一定的電勢。相反，改變兩端面上的電壓，



也會產生一定的伸縮變形的現象。若利用上述物質的壓電效應，在兩面加 16kHz 以上的交變電壓，則該物質會產生高頻的伸縮變形，使周圍的介質作超音波振動。為了獲得最大的超音波強度，應使晶體處於共振狀態，故晶體片厚度應為超音波半波長或整倍數。石英晶體的伸縮量太小，3000V 電壓才能產生 0.01 $\mu$ m 以下的變形。鈦酸鋇的壓電效應比石英晶體大 20~30 倍，但效率和機械強度不如石英晶體，鉻鈦酸鉛具有二者的優點，一般可用作超音波清洗、探測和小功率超音波加工的換能器。

### 3) 變幅杆

變幅杆（又稱振幅放大器）的作用是放大換能器所獲得的超音波振動振幅，以滿足超音波加工的需要。常用的變幅杆有外徑變化的實心型和內徑變化的空心型（圖 2.7）。兩種類型的變幅杆沿長度上的截面變化是不同的，但杆上每一截面的振動能量是不變的（不考慮傳播損耗）。截面越小，能量密度越大，振動的幅值也就越大，所以各種變幅杆的放大倍數都不相同。

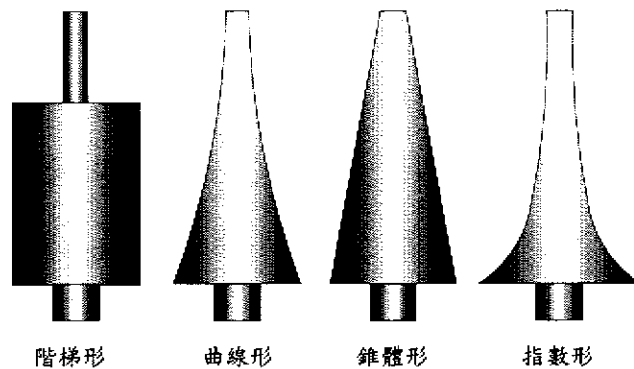


圖 2.7 常見變幅杆截面變化形式

為了獲得較大的振幅，應使變幅杆的固有振動頻率和外激振動頻率相等，處於共振狀態。為此，在設計、製造變幅杆時，應使其長度等於超音波振動波的半波長或其整倍數。

變幅杆性能的主要指標，一般是共振頻率、振幅擴大比、輸入阻抗隨頻率和負變化的特性等。在面積係數（指大小直徑比）相同的情況下，錐形變幅杆的振幅擴大比較小（5~10 倍），但易於製造；指數形變幅杆的振幅擴大比中等（10~20 倍），使用中性能穩定，但不易製造，階梯形變幅杆的振幅擴大比較大（20 倍以上），且易於製造，但受到負載阻力時振幅減小的現象比較嚴重，不穩定，而且在粗細過渡的地方容易產生應力集中而疲勞斷裂，為此須加過渡

圓弧。實際生產中，加工小孔、深孔常用指數形變幅杆；階梯形變幅杆因設計製造容易，一般也常採用。此外，要求變幅杆的輸入阻抗隨頻率和負載變化比較小。

變幅杆一方面是在使變載負荷作用下工作，另一方面在傳遞和放大超音波的振動能量的同時會產生溫升。因此，要求變幅杆材料應聲阻小、熱損耗低、抗疲勞強度高。製造方便、價格適宜。綜合考慮，目前常用的變幅杆材料為中碳鋼和工具鋼。

應該指出，超音波加工並不是整個變幅杆和工具都是在作上下高頻振動，與低頻或工頻振動概念完全不一樣。超音波在金屬棒杆內主要以縱波形式傳播，引起杆內各點沿波的前進方向按正弦規律在原地作往復振動，並以聲速傳導到工具端面，使工具端面作超音波振動。

#### 4) 工具：

超音波的機械振動經變幅杆放大後傳給工具，使磨粒和工作液以一定的能量衝擊工件，並加工出一定的尺寸和形狀。

工具的形狀和尺寸決定於工件表面的形狀和尺寸，兩者相差一個“加工間隙”（稍大於平均的磨粒直徑）。當工件表面積較小或批

量較少時，工具和變幅杆做成一個整體，否則可將工具用焊接成螺紋連結等方法固定在變幅杆下端。當工具不大時，可以忽略工具對振動的影響，但當工具較重時，會減低振動系統的共振頻率；工具較長時，應對變幅杆進行修正，以滿足半個波長的共振條件。整個振動系統的連接部分應接觸緊密，否則超音波傳遞過程中將損失很大能量。在螺紋連接處應塗以凡士林油，絕不可存在空氣間隙，因為超音波通過空氣時會很快衰減。換能器、變幅杆或整個振動系統應選擇在振幅為零的駐波節點。

按照波動的合成原理，當系統處在共振狀態時，只有在此駐波節點平面內，從單方向入射波和反方向反射波引起的質點位移恰好大小相等方向相反，其合成位移始終為零。例如換能器長度  $1/2$  處的中間截面上的任何點，即為靜止不動的波節點，以後向兩端處振幅即逐漸增大，到換能器與變幅杆交界面上振幅為最大，稱波腹點。以後振幅又逐漸減小再次出現波節點，到工具端面處再次出現振幅更大的波腹點。整個振動系統應選擇波節點支承固緊在機床上。

在超音波加工中，工具在縱向和橫向都會磨損，工具端面的磨損是主要的，側面的磨損僅佔全部磨損的 1/10。這樣，不僅直接影響加工速度和加工精度，而且會破壞振動系統的共振條件，降低加工效率。工具磨損量的大小，主要取決於工具材料、結構和工件材料。試驗表明，加工一般硬脆材料，多用中碳鋼或碳素工具鋼作工具材料，因為這些材料具有抗疲勞强度高、比較耐磨損，加工容易的特點。如果要求加工精度較高時，採用硬質合金或淬火鋼較好，必要時可採用金鋼石表面鍍層工具。

#### 5) 機床：

超音波加工機床一般比較簡單，包括支撐振動系統的機架及工作檯面。使工具以一定壓力作用在工件上的送給機構，以及床身等部分。振動系統安裝在一根能上下移動的導軌上；導軌由上下兩組滾動導輪定位，使導軌能靈活可靠地上下移動。工具的向下進給及對工件施加壓力靠振動系統自重，為了能調節壓力大小，在機床後面有可加減的平衡重錘，也有採用彈簧或其他辦法加壓的。

#### 6) 磨料懸浮液循環系統：

簡單的超音波加工裝置，其磨料是靠人工輸送和更換的，即在加工前將懸浮磨料的工作液澆注在加工區，加工過程中定時抬起工具和補充磨料。也可利用小型離心泵使磨料懸浮液攪拌後澆注到加工間隙中去。對於較深的加工表面，仍經常應將工具定時抬起以利磨料的更換和補充。大型超音波加工機床都採用流量泵自動向加工區供給磨料懸浮液，且品質好，循環良好。此外，工具和變幅杆尺寸較大時，可在工具和變幅杆中間開孔，由孔內抽吸磨料懸浮液，對提高加工質量有利

## 2.1.6 超音波加工的基本參數

### (1) 影響加工速度的因素

加工速度是指單位時間內去除材料的多少，單位通常以  $\text{g/min}$  或  $\text{mm}^3/\text{min}$  表示，或者用單位時間在進給方向上的進給量來表示，其單位為  $\text{mm}^3/\text{min}$ 。超音波加工的加工速度比較低，一般為  $1 \sim 5 \text{mm}^3/\text{min}$ 。加工玻璃的最大速度可達  $2000 \sim 4000 \text{mm}^3/\text{min}$ 。影響加工速度的因素有：工具振動頻率、振幅、工具和工件間的靜壓力、工具與工件材料、磨料種類及粒度、磨料懸浮液的濃度、磨料懸浮液的

循環與供給、加工面積加工深度等。

### 1) 工具的振動振幅和頻率

隨著工具振動振幅和頻率的增大，加工速度明顯提高。但是，過大的振幅和過高的頻率會使工具和變幅杆承受很大的內應力，嚴重時會超過工具和變幅杆材料的疲勞強度，降低其使用壽命；隨著工具振動振幅和頻率的增加，加大了工具與變幅杆、變幅杆與換能器之間連接處的能量損耗。因此，要求超音波加工工具振動振幅為 0.01~0.1mm，頻率為 16k~25kHz。實際加工時，應調至共振頻率，以獲得最大的振幅。

### 2) 工件和工具材料

超音波加工尤其適用於高脆度（脆度是材料的剪切應力與斷裂應力之比）材料的工件。工件材料愈脆，所承受衝擊載荷的能力愈低，也就愈易被去除加工；而韌性較好的工件材料則不易加工。工具材料應根據工件材料、加工面積和深度等因素來選擇，以耐磨損、加工方便為宜。也可由實驗確定。

### 3) 磨料的種類和粒度

磨料的種類必須根據工件材料合理選擇。例如：加工金鋼石和寶石等超硬材料時，必須用金鋼石磨料；加工硬質合金、淬火鋼等高硬脆性材料時，宜採用硬度較高的碳化硼磨料；加工硬度不太高的脆硬材料時，可採用碳化矽；而加工玻璃、石英、半導體等材料時，用氧化鋁磨料較適合。磨料的粒度與加工速度的關係如圖 5-12 所示，在工件材料和加工振幅一定的條件下，隨著粒度號數的增大（磨

粒越細），加工速度隨之增大，但超過某值之後，粒度號數增大，加工速度則降低。

#### 4) 磨料懸浮液的類型及濃度

磨料懸浮液有水、汽油、煤油、酒精、變壓器油、甘油等，其中水的冷卻性和溫潤性良好，相對生產率最高，其次是汽油或煤油。磨料懸浮液的濃度，直接影響加工速度。磨料懸浮液濃度低，加工間隙內磨粒少，特別在加工面積和深度較大時可能造成加工區局部無磨料的現象，使加工速度大大降低。隨著懸浮液中磨料濃度的增加，加工速度也增加。但濃度太高時，磨粒在加工區域的循環和對工件的衝擊都受到影響，也會導致加工速度降低。通常採用的濃度為磨料對水的重量比為 0.5~1 左右。

#### (2) 影響加工精度的因素

超音波加工的精度，除受機床、夾具精度的影響之外，主要與磨料粒度、工具的精度及磨損、橫向振動、加工深度、工件材料性質等有關。

超音波加工孔時，其孔的尺寸將比工具尺寸有所擴大，擴大量約為磨料磨粒直徑的兩倍，孔的最小直徑約等於工具直徑加所用磨料磨粒平均直徑的兩倍，即

$$D_{\min} = D_t + 2d_a \quad (5-9)$$

式中  $D_{\min}$  --- 工件最小孔徑 (mm) ；

$D_t$  --- 工具直徑 (mm) ；



da ---磨料磨粒平均直徑 (um)

可見，孔的加工精度直接受到工具精度和磨粒粗細的影響。通常，用 #240~#280 磨粒時，可獲得正負 0.05mm 的加工精度，用 W28~W7 時，可獲得正負 0.02mm 的加工精度。此外，孔的形狀誤差與工具的不均勻磨損及橫向振動大小有關。一般可採用工具或工件轉動的加工方式來減小孔的圓度誤差。

超音波加工孔時，一般容易出現錐度和孔的出口處有微破損。其原因主要是由於變幅杆及工具的橫向振動引起磨料對孔壁的二次衝擊，形成從進口到出口逐漸減小的錐度；出口處微破損則是磨料懸浮液在出口側壁間隙處迅速排出，使磨料循環時間過短所造成的。如用 #240 碳化硼磨料加工 5~10mm 深的孔，所形成的錐度為  $1^\circ$ ，若穿孔後再用未磨損的工具作低頻振動修磨，錐度可以減小。在多數情況下，使用精密工具幾乎完全可避免孔的錐度。

超音波加工所用的磨料粒度本來就是不均勻的，加工中又要被磨頓、甚至破碎，更加深了磨料的不均勻性。因此，不僅影響加工速度更影響加工精度。加工時必須經常攪動磨料懸浮液，保證一定的循環速度，使用 10~15h 後應及時更換，還可設法向工具端面噴注磨料懸浮液，以提高加工精度。

### (3) 影響加工表面的因素

超音波加工具有較好的表面，非但不會產生燒傷和表面變質層、熱應力，有時反而產生表面壓應力，對提高工件的疲勞強度和抗應力腐蝕能力有益。超音波加工的工件表面粗糙度較低，可達  $Ra0.63 \sim 0.08\mu m$ ，主要取決於每粒磨料每次衝擊工件表面後留下的凹痕大小，並與超音波振動的振幅、磨粒的直徑、工件材料的性質以及磨料懸浮液的成分等有關。

當磨粒比較細，工作材料硬度較高、超音波振幅較小時，工件的表面粗糙度將得到改善，但生產率隨之降低。磨料懸浮液的性能對表面粗糙度的影響比較複雜，且文獻較少。資料表明，用煤油或潤滑油代替水可使表面粗糙度有所改善。

超音波加工 (Ultrasonic Machining-USM) 是使金屬棒狀刀具以約 20KHz 的週波數震動，此震動係利用喇叭頭 (Horn)，將數十微米之振幅傳達到工具進行加工。為了方便排出切屑，horn 採中空設計，由外部藉著水套 (water jacket) 提供水流。工具只由單一方向震動，不做迴轉運動，如圖 2.1。由於切削作用主要來自游離磨料之衝擊，在切削過程中也易於磨耗。尤其靠近工具底部，磨耗量特大，側面易產生推拔現象，影響工件加工之精準度，此其最大缺點。不過因加工限制較少則是迴轉式超音波加工無法做到。

## 2.2 超音波加工切削理論

超音波加工時其材料去除主要經由三種作用(一)磨粒之衝擊及切削(二)孔蝕 (cavitation) (三) 切削液與工件材料間之化學作用。由 Rozenberg 及 Kazantsev 等人的實驗觀察中得知孔蝕多發生於移動件也就是刀具四周；因此其對刀具所造成之傷害遠大於工件。而在迴轉式超音波加工中多以水為切削液；其與工件材料間之化學作用亦不明顯。故在迴轉式超音波加工中主要之材料去除方式為磨粒之衝擊及切削。

在軸向之超音波振動方面，超音波之震源乃由主軸上端之疊狀壓電材料 (PZT stack) 形成。當高頻率變化之電壓輸入後，在縱軸向產生半波長的共振，往復式之振動趨近於彈簧及質量的共振頻率時，二質量中心會產生最大振幅，而兩旁的摩擦力則能阻止振幅的不斷增加。刀具之超音波鉋擊振動來自於高週波震盪回路，經由壓電材料將交流輸出轉換成機械振動衝擊硬脆材料，使材料在高頻振動下，造成材料應力集中於被切削部位。超音波振動磨粒之運動方程式為

$$P(t) = \frac{A}{2} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

其中  $A$  為振幅， $f$  為振頻，其速度可由下式得

$$P'(t) = \pi f A \cos(2\pi ft) \quad (2)$$

若包含 horn 的整個振動系之等效質量為  $m_{eq}$  時，則其近似之平均衝擊力  $F_{av}$  為

$$F_{av} = \frac{m_{eq}}{\Delta T} P'(t) = \frac{m_{eq}}{\Delta T} \pi f A \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

其中 $\Delta T$ 為磨粒與加工表面之接觸時間。

其次，若刀具與加工表面之接觸面積為 $S$ ，磨粒濃度為 $V_a$ ，平均磨粒粒徑為 $d_{av}$ ，則於同一時間內切削之磨粒數 $N_a$ 為

$$N_a = \frac{C_0 S}{d_{av}^2} \left( \frac{6V_a}{\pi} \right) \quad (4)$$

其中 $C_0$ 為常數。

單一磨粒和加工物接觸時之衝擊力 $F_0$ 為

$$F_0 = \frac{F_{av}}{N_a} = \frac{1}{N_a} \left( \frac{m_{eq}}{\Delta T} \pi f A \cos(2\pi f t) \right) \quad (5)$$

其最大值 $F_{0m}$ 為

$$F_{0m} = \frac{1}{N_a} \left( \frac{m_{eq}}{\Delta T} \pi f A \right) \quad (6)$$

設磨粒為球型，而以 Hertz(1882) 理論當兩平滑球體受負荷力 $F$ 使相接觸時其表面之平均接觸壓應力 $P_{av}$ 為

$$P_{av} \propto \left[ \frac{F (1/R_1 + 1/R_2)^2}{(1/E_1 + 1/E_2)^2} \right]^3 \quad (7)$$

式中 $E_1$ 、 $E_2$ 為當兩平滑球體之彈性係數。重新整理上式可得

$$F = \frac{c_1 P_{av}^3 (1/E_1 + 1/E_2)^2}{(1/R_1 + 1/R_2)^2} \quad (8)$$

其中  $C_1$  為常數。而當  $R_1 \rightarrow \infty$  且  $R_2 = d_0/2$  (以直徑為  $d_0$  之磨粒壓入平面) 時

$$F = c_2 d_0^2 P_{av}^3 (1/E_1 + 1/E_2)^2 \quad (9)$$

式中  $E_1$  為磨粒之彈性係數而  $E_2$  為工件之彈性係數。由上式可導出切入加工物之臨界力  $F_c$  為當平均接觸壓應力  $P_{av}$  達到材料之降伏應力  $Y$  時，亦即

$$F_c = c_2 d_0^2 Y^3 (1/E_1 + 1/E_2)^2 \quad (10)$$

為提高加工效率，必須降低磨粒切入加工物之臨界應力  $F_c$ ，其中包括：加工物之降伏強度  $Y$  要較低，磨粒粒徑  $d_0$  要小以提高加工之集中應力；磨粒彈性係數  $E_1$  及工件彈性係數  $E_2$  要大。但一般加工時之情形為加工物、磨料皆已決定，即  $Y$ 、 $E_1$ 、 $E_2$  皆已固定，故加工臨界應力只與磨粒粒度有關；即粒徑越小者加工臨界應力越小，越容易加工。

由理論而言，當磨粒之加工衝擊力大於加工臨界應力時 ( $F_{0m} > F_c$ )，磨粒可切入工件而進行加工；反之，當磨粒之加工衝擊力小於加工臨界應力時 ( $F_c > F_{0m}$ ) 磨粒僅造成工件之彈性變形。因而材料

去除率正比於 $(F_{0m} - F_c)$ ，振頻 $f$ 及同一時間內切削之磨粒數 $N_a$ 。

$$Z = c_3 N_a f (F_{0m} - F_c) \quad (11)$$

刀具的振幅愈大則所造成之裂痕、切屑碎片亦愈多；衝擊點愈密愈多則切屑碎片亦愈細碎；磨粒粒徑愈大(號數愈低)影響之範圍亦愈大。亦即，若只考慮加工效率時，超音波的振幅越大，磨粒粒徑愈大(號數愈低)，則加工效率越好，但加工面之粗度會較差。這是因為振幅提高也將提高刀具對加工物之加工應力，而造成大量脆性破壞，雖然提高加工效率但也使表面粗糙度變差。

此外當超音波在水性切削液體中進行時，因音波本身為疏密波，當液體中負壓過大時，可將水分子之間的氫鍵打斷，爾使液體被拉裂產生空孔，此即孔蝕（Cavitation）現象。流體受超音波造成的壓差，在工件表面形成蒸汽泡，當壓差持續的增加，蒸汽泡不斷的擴大，超過流體的表面張力而爆裂，並大量的帶走切屑。

與磨粒之切削能力相關之參數有主軸轉速、超音波之震幅及振頻、刀具進給量、磨粒種類(硬度)、磨粒粒度、磨粒之結合方式、磨粒之濃度(concentration)、刀具材料/形狀及工件之材料特性等(Umino et al 1986, Komaraiah et al 1988, Doutsu et al 1990, Wang & Lin 1993, Ho et al 1994)。

在選取加工參數時除了希望能有較大之材料去除率(material removal rate)外，滿足各項幾何尺寸精度及表面特性(如表面粗糙度等)之要求更為重要。

Umino et al (1986), Doutsu et al (1990), Wang & Lin (1993) 及 Ho et al (1994)曾對 玻璃、陶瓷或 Zerodur 等脆性材料做過迴轉式超音波加工研究並對一些加工參數之影響進行探討，惜實驗量測數據較少且缺乏加工表面及次表面之微觀分析。若要得到較具體之結論則須進行更廣泛更深入之超音波加工實驗；並分析加工表面及次表面之微觀特性，工件之各項幾何尺寸精度及刀具磨耗與加工參數之關係。此外，超音波加工機本身之各項精度誤差(如熱變形、主軸之偏擺量等)亦可對工件之幾何尺寸精度造成影響。故對超音波加工機做誤差分析除可將加工機造成之影響與加工參數之影響加以分離；亦可研究減少或補償誤差之可能方法。

## 2.3 超音波加工實驗

### 2.3.1 實驗流程

本研究之超音波加工實驗流程如圖 2.8 所示：先對被加工材料進行微機械性質之探討而後設定超音波加工之加工參數(如切削時之刀具磨粒粒度、震幅、進給率、主軸轉速等)而後在超音波切削加工機上進行各項超音波切削實驗。於加工完成後除以 OM/SEM 分析加工表面之微觀結構及量測表面粗糙度等外並量測刀具之損耗(wear loss)及觀察刀具表面之微觀組織以研究其磨耗機構及成因。

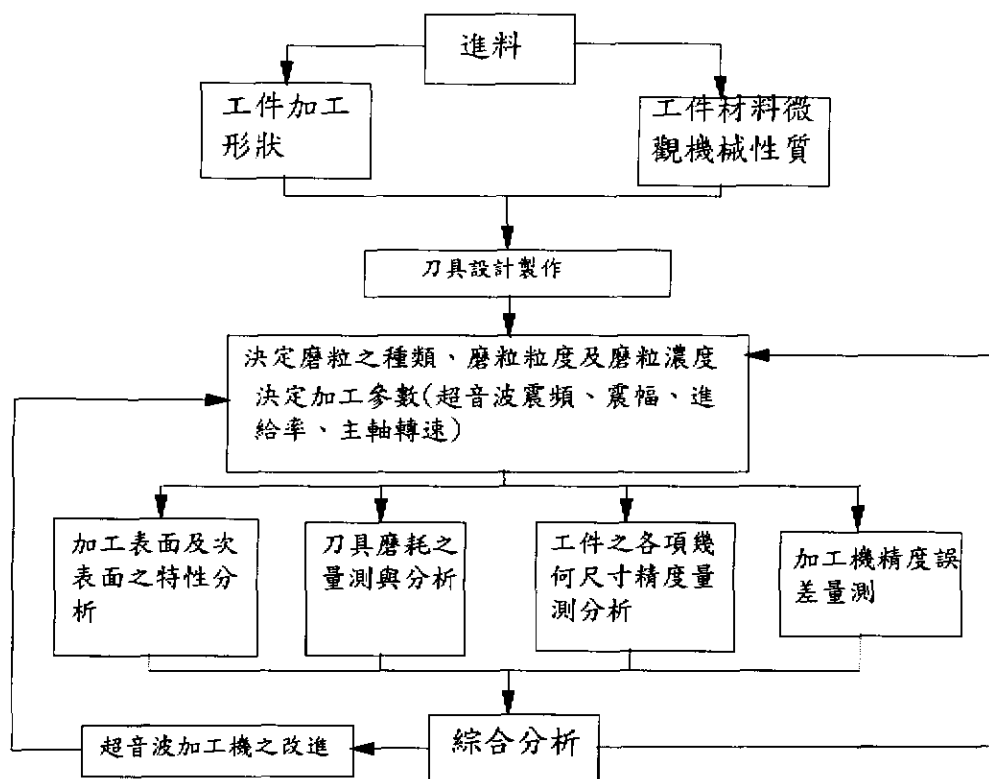


圖 2.8 超音波加工實驗流程

綜合以上觀察所得進行分析其結果則可對所採用之超音波加工之加工參數加以評估以建立各加工參數與加工結果間的關係。

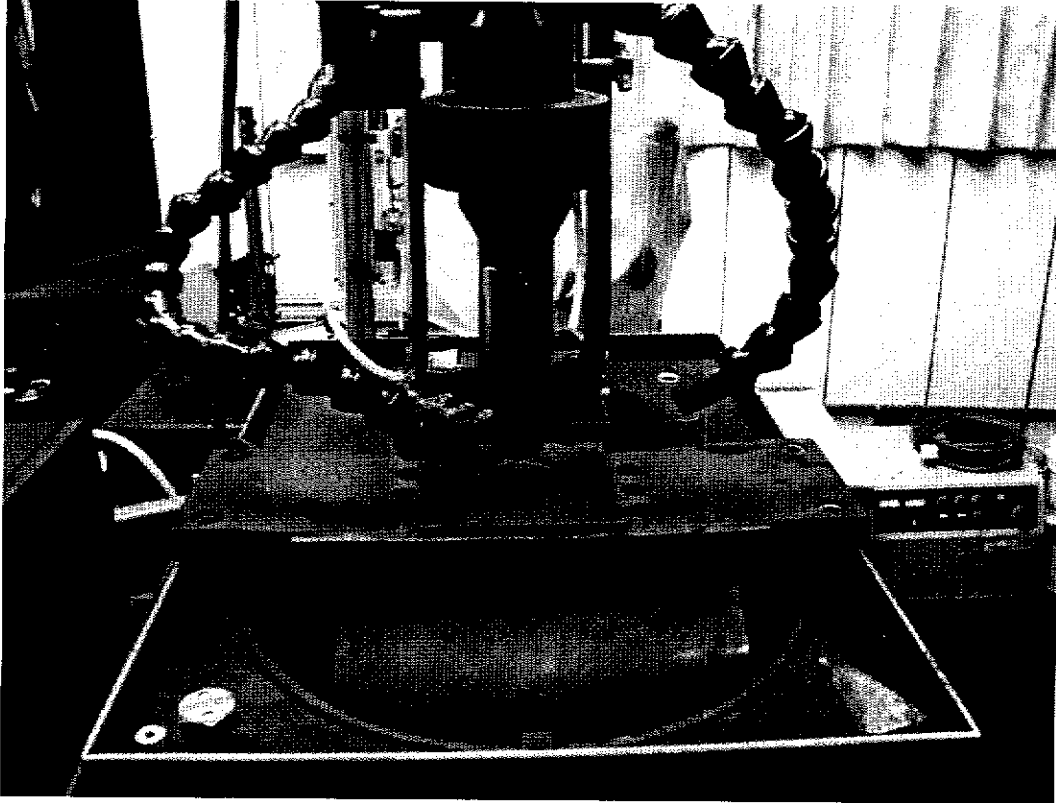
### 2.3.2 實驗儀具及加工材料

本實驗所採用之主要儀具有：

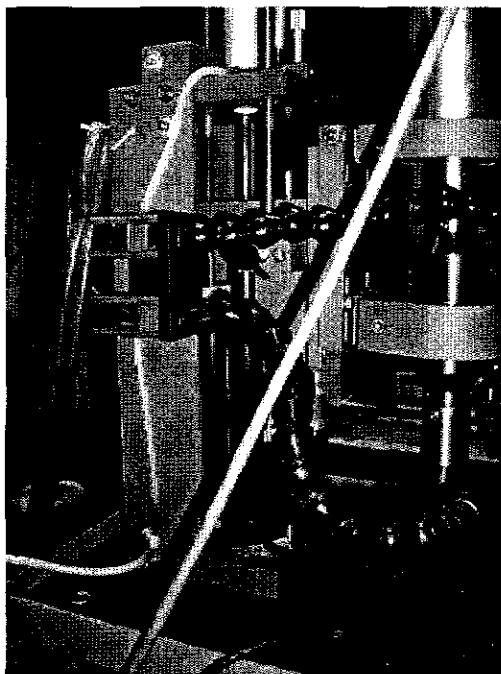
超音波加工機：美 Sonic-Mill<sup>SM</sup> 製之 Stationary Process 微超音波加工機，其發振系統為 Branson 製，振頻為 20KHz，圖 2.9(a)-(c) 為本實驗用之微超音波加工機、控制器圖 2.9(d)及其研磨



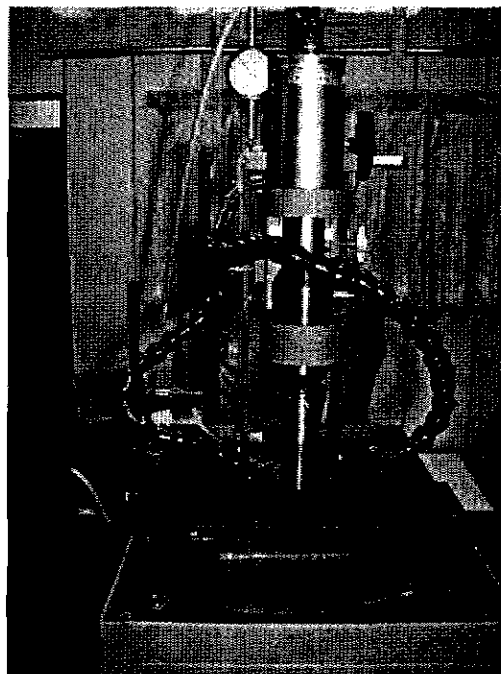
液之循環幫浦圖 2.9(e)。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

圖 2.9 微超音波加工機

超音波加工之加工刀具：圖 2.10 所示為本研究使用之微超音波變幅杆示意圖，而圖 2.11 所示為本研究之微超音波加工刀具設計圖

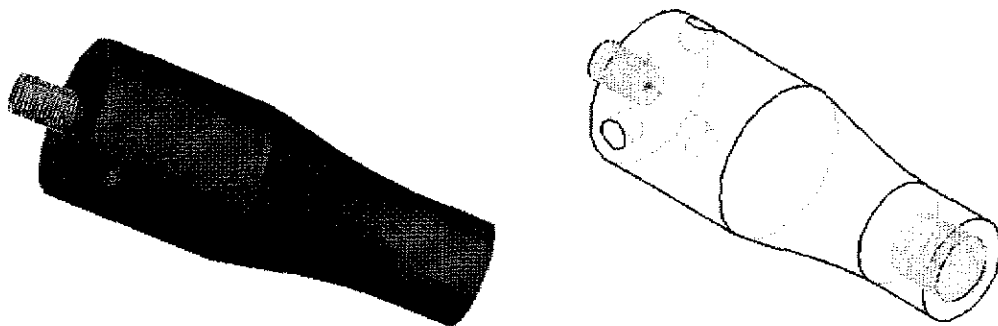
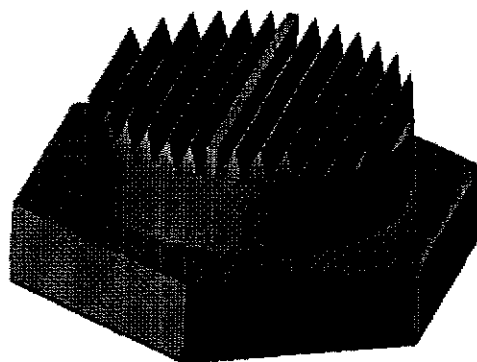
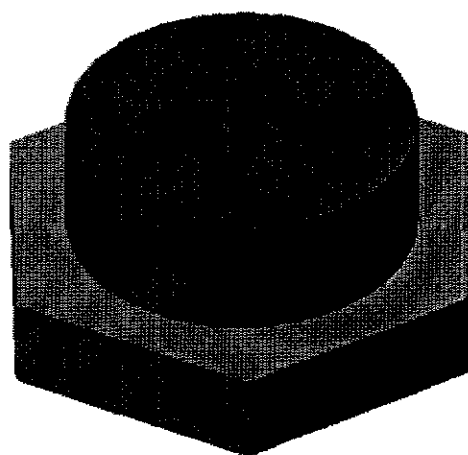


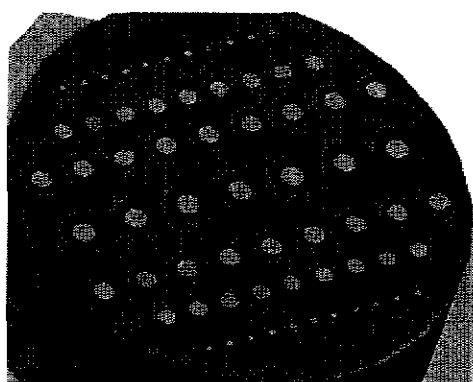
圖 2.10 微超音波變幅杆



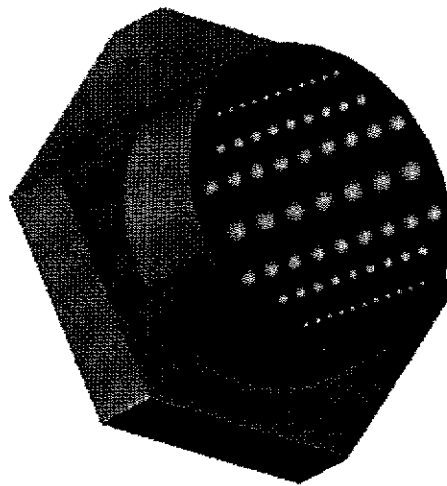
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 2.11 微超音波加工刀具設計圖

微硬度測試儀：實驗所用之微硬度測試儀有 Matsuzawa Seiki model:MHT-1 及 Micro Materials model: Nanotest 500。垂直負荷範圍由 1g (10mN) 至 1000 g (9.81 N)。Miniload 2 及 Seiki model:MHT-1 之下降時間（壓痕器自最高點降至試片表面所需時間）約為 15 秒；約再經過 10-15 秒後負荷達到最大值。最大負荷在本實驗中維持約 15 秒。而負荷施加率(僅 Nanotest 500 可控制負荷率)之範圍由 0.35mN/s 至 2.5mN/s。

表面粗糙度量儀：Veeco/Sloan Technology Model Dektak<sup>3</sup>ST

光學顯微鏡：Nikon，立體光學顯微鏡 Olympus Model SZ6045TRPT

電子顯微鏡：Philips Model SEM 515

實物投影機：Mitutoyo Model PJ3000，物鏡放大倍率至 x100

工件材料：經拋光之玻璃陶瓷材料 Zerodur，Zerodur 是由德國 Schott 公司生產的一種玻璃陶瓷(glass-ceramics)。Zerodur 具有極低之熱膨脹係數(在 0°C 到 50°C 間 Zerodur 之熱膨脹係數為  $0 \pm 0.02 \times 10^{-6}/K$  至  $0 \pm 0.10 \times 10^{-6}/K$  間；而在 -50°C 到 100°C 間 Zerodur 之熱膨脹比  $\delta L/L \leq 10 \times 10^{-6}$ ) 及良好之均勻性(homogeneity) 使其在光學、量測、定位系統上被廣泛的利用。但因為 Zerodur 是一種硬脆性材料，被加工時極易產生脆斷、裂痕等缺陷使得表面粗糙度及尺寸精度難於控制 (Bifano et al 1988; Puttick et al 1980, 1989; Ker 1993; Chao et al 1995)。

### 2.3.3 超音波加工實驗加工參數

本超音波加工實驗中將轉速固定於最大穩定轉速 4900rpm，切削液水壓固定於 2kgf 而頻率則固定於 20kHz；加工實驗中改變之加工參數有磨粒粒度及刀具進給等參數如表 2.1：

表 2.1、超音波加工實驗加工參數

超音波振動頻率	20kHz
刀具進給(mm/min)	0.06、0.1、0.5、1、1.5
磨料濃度	5%、10%、20%、30%

磨輪粒度( $\mu\text{m}$ )	0.3、1、2、5、12、30、50、60
磨輪種類	SiC、 $\text{Al}_2\text{O}_3$

## 2.4 超音波加工研究方法

### 1. 材料試片之切削加工：

#### (1) 石英玻璃等脆性材料之微觀機械性質的分析：

微硬度壓痕實驗(nano-indentation)用微硬度壓痕實驗來獲取脆性材料之微觀的(Microscopic)機械及物理特性及用來模擬超音波加工中刀具將磨粒向工件表面擠壓而造成工件表面之微壓痕式的破壞。

微刻痕實驗(Scratching Tests)：刻痕實驗在本研究計劃中被用來模擬一些低速的切削動作及切削時材料的變形、破壞、及去除機構。

#### (2) 微超音波刀具之設計與製作：

以微放電加工方法製作各不同升寬比之薄板及柱狀之微超音波刀具以供超音波加工切削使用。

#### (3) 設定切削加工參數及進行超音波加工

設定超音波加工切削時之(a) 刀具參數 - 磨粒之種類、磨粒粒度及磨粒濃度、刀具長度 (b) 加工參數 - 震頻、震幅、進給率、主軸轉速 而後在超音波切削加工機上進行各項超音波切削實驗。

## 2. 加工表面及次表面之特性分析：

- (1) 以微硬度儀(Nano-indentation Tester)量測分析加工表面之微機械性質並與加工前做比較。
- (2) SEM/AFM 分析加工表面之微觀組織。
- (3) 以 TEM 分析工件截面之顯微組織。
- (4) 以腐蝕法顯現次表面之變質層(次表面裂痕等)並配合 SEM/AFM 觀察。

## 3. 刀具磨耗之量測與分析：

於加工參數之選定後進行超音波加工中以OM/SEM量測分析刀具之幾何形狀改變及刀具表面之顯微組織以研究其磨耗機構及成因。

## 4. 工件之各項幾何尺寸精度量測分析：

以原子力顯微鏡(AFM)量測工件之表面粗糙度、並以SEM觀察分析其幾何尺寸精度。

5. 對超音波加工機進行各項精度誤差量測並分析其對工件之各項幾何尺寸精度可能造成之影響。
6. 由分析所得數據對超音波加工機欲進行精密之微超音波加工時所必須改進之部份提出概念設計。微超音波加工系統的架構一般包含機台組成、驅動和控制組成(x,y,z 三軸向之運動控制)、超音波振盪器組成及磨料循環供給組成。目前中科院所擁有之超音波加工機僅有軸向之運動控制無x,y兩軸之運動控制，亦無線上觀測工



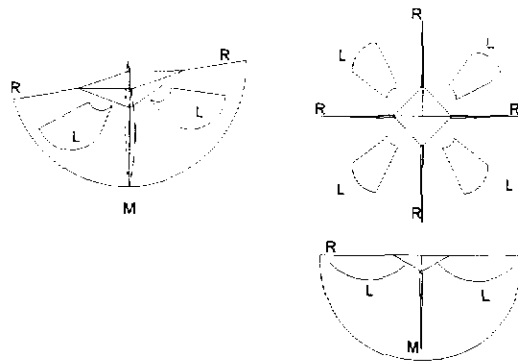
件及刀具用之設備。在第二年之計畫中則將對概念設計之微超音波加工機進行實體細部設計、製作及加工測試並於第三年之計畫中配合微精密平台之研製及刀具設計以進行3D之MEMS加工。

### 三、結果與討論

#### 3.1 前言

超音波加工時其材料去除主要經由三種作用(一)磨粒之衝擊及切削(二)孔蝕 (cavitation) (三) 切削液與工件材料間之化學作用。由 Rozenberg 及 Kazantsev 等人的實驗觀察中得知孔蝕多發生於移動件也就是刀具四周；因此其對刀具所造成之傷害遠大於工件。而在迴轉式超音波加工中多以水為切削液；其與工件材料間之化學作用亦不明顯。故在迴轉式超音波加工中主要之材料去除方式為磨粒之衝擊及切削。

迴轉式超音波加工(RUM)其材料去除率(MRR, material removal rate)及其所得表面之表面粗糙度一般優於超音波加工(非迴轉式)(UM)。因為非迴轉式超音波加工中其主要之材料去除機構(Material Removal Mechanism) 為之刀具將磨粒向工件表面擠壓而造成工件表面之微壓痕式的破壞(Micro-indentation)(圖3.1)。而一系列之磨粒擠壓使工件表面因微壓痕生成之微裂痕(micro-crack)延伸連結造成微破裂(micro-chipping)以達致材料去除之目的。

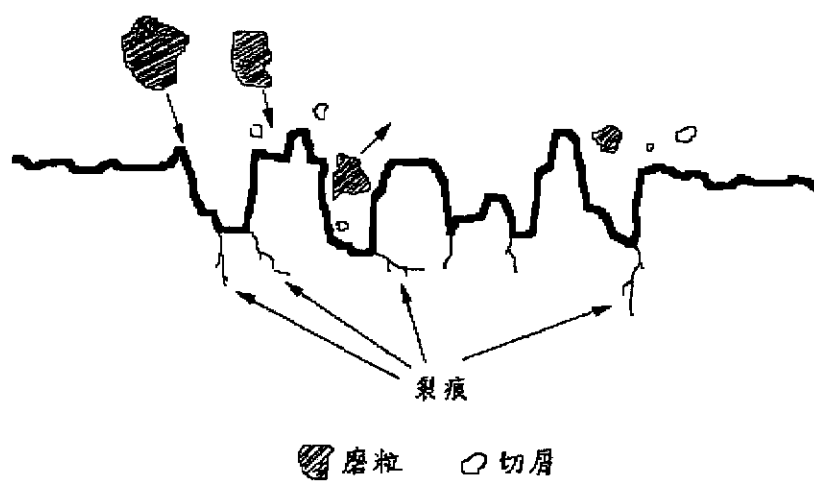


• R: radial crack M: median crack L: lateral crack

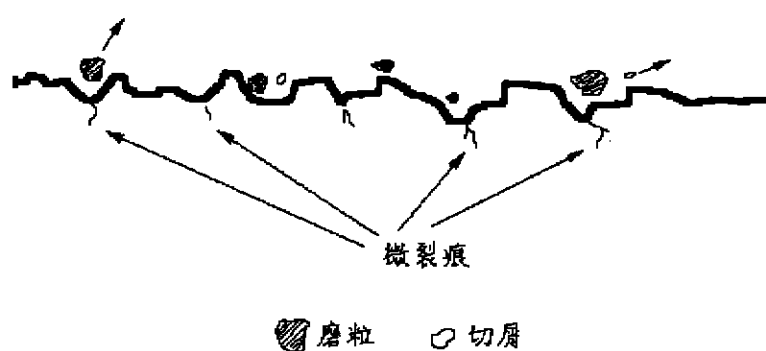
圖3.1、微壓痕周邊之裂痕

### 3.2 超音波加工參數：

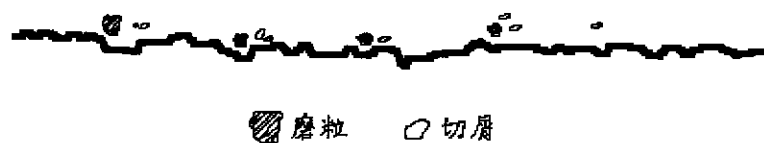
碳化矽磨粒： $(\mu\text{m})$	加工速率： (mm/min)	磨料濃度
50	1.5、1、0.5	1 : 20
12	1.5、1、0.5	1 : 20
5	0.5、0.1	1 : 20、1 : 10、1 : 5
2	0.1	1 : 5、1 : 3
1	0.1	1 : 5、1 : 3
氧化鋁磨粒： $(\mu\text{m})$	加工速率： (mm/min)	磨料濃度
0.3	< 0.1	1 : 3



(a)



(b)



(c)

圖 3.2、加工機制與磨粒粒徑關係之示意圖

磨粒粒徑大具較佳的材料移除率，但相對的在加工方面會造成較大的

破裂及較大的裂痕，若要求好的表面粗度下不會選擇大的磨粒來進行加工。粒徑小的磨粒在加工時會得到較佳的表面粗度、較好的表面完整性和較小的微裂痕。

上圖(3.2)為在小磨粒下微進給或無進給下進行超音波加工，利用空化效應來達到微去除材料的效果。由實驗中發現，利用此加工方式可得到最佳的表面粗度  $Ra=(150nm)$ ，幾乎達半透光的程度。

### 3.3 實驗結果

#### 3.3.1 磨粒大小對超音波加工結果的影響

實驗結果說明磨粒的大小將造成表面粗度的改變 (圖 3.3)，且磨粒的尺寸也應匹配超音波的振幅，起初我們先用  $60\mu m$  的碳化矽磨粒，發現加工出來的表面粗度很差( $Ra=1.2\mu m$ ) (圖 3.4)，而且表面邊緣的微裂(micro chipping)較大且較嚴重(圖 3.5)，接著改用  $5\mu m$  的碳化矽磨粒，發現表面粗度有改善(圖 3.6)， $Ra$  降為  $0.9\mu m$ ，用  $2\mu m$  的碳化矽磨粒加工時更降到  $0.47\mu m$ (圖 3.7)且表面微裂也改善不少(圖 3.8)，但當用到  $0.3\mu m$  的氧化鋁磨粒加工時表面情況反而變差，這是因為磨粒的尺寸太小造成刀具和材料間的間隙過小，以致磨料無法順利進給加工。所以磨粒越小所加工的表面粗度越好，但磨粒太小則無法進行超音波加工。

此外磨粒大小也造成材料移除率的不同，我們固定施加的荷重，卻發現用  $60\mu m$  碳化矽磨粒時進給率較快，但用  $2\mu m$  甚至  $0.3\mu m$  的磨粒時進給率變的極慢，磨粒越小進給率變慢越明顯，如我們用

60  $\mu\text{m}$  碳化矽磨粒加工時速率可達 1mm/min，但當使用到 0.3  $\mu\text{m}$  的磨粒加工時速率只能達 0.05 mm/min。

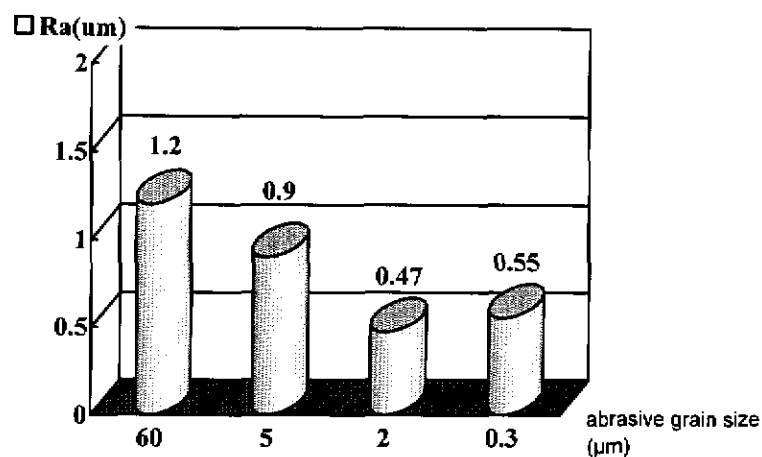


圖 3.3 磨粒大小與表面粗度的關係

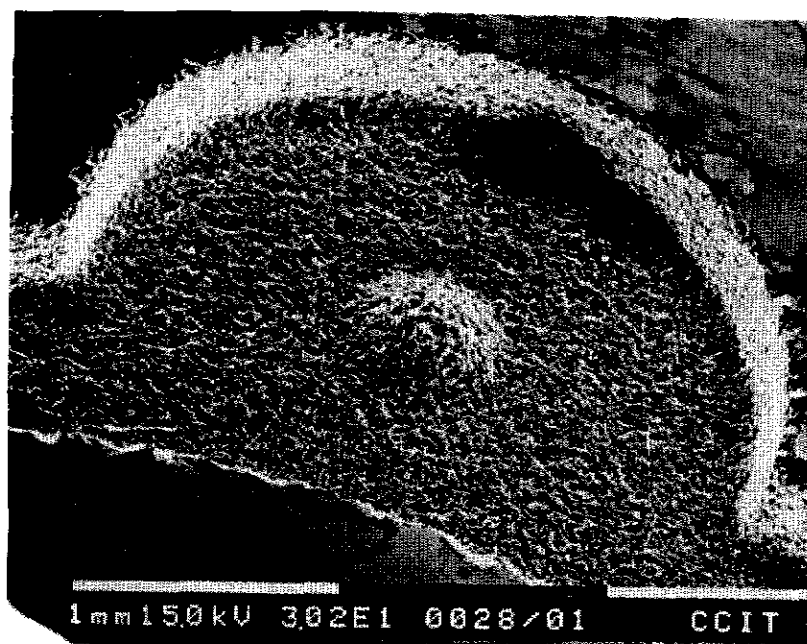


圖 3.4. 經 60  $\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工過後的表面情況

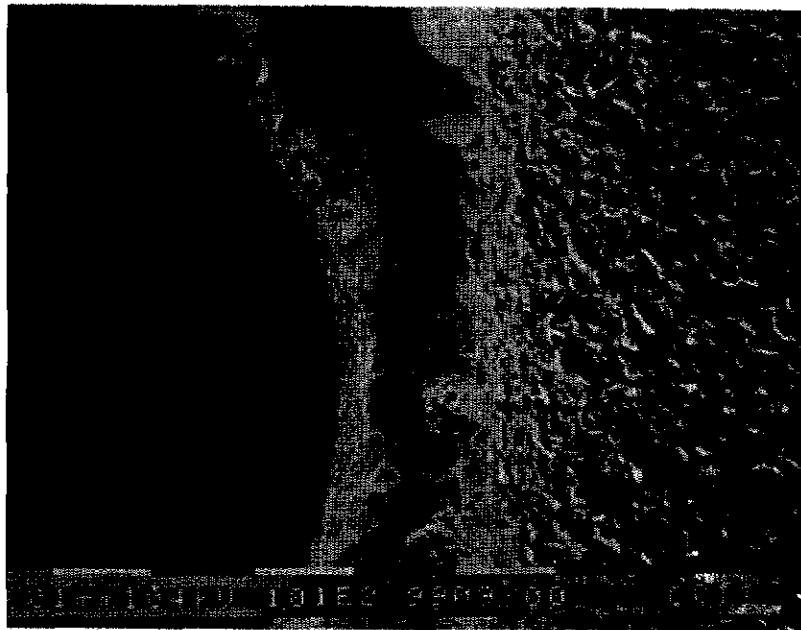


圖 3.5. 經  $60\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工後表面邊緣的微裂

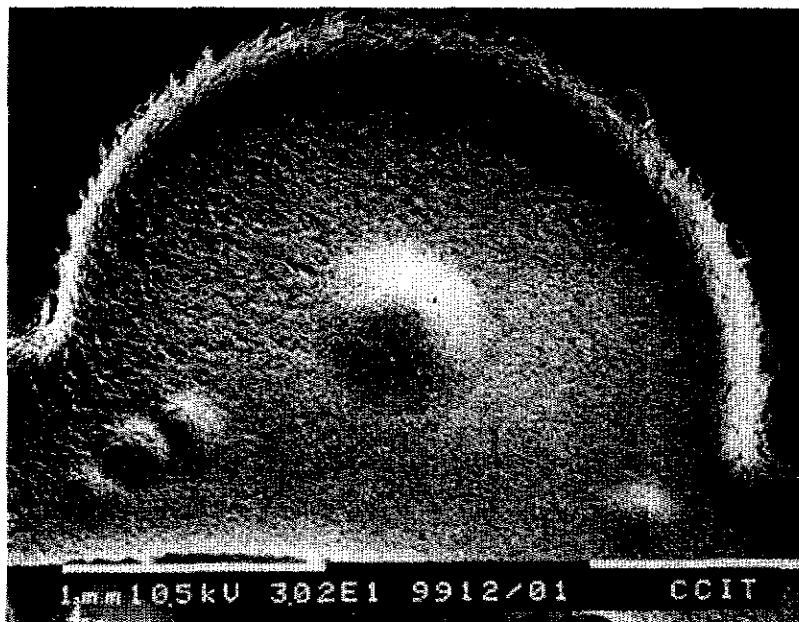


圖 3.6. 經  $5\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工過後的表面情況

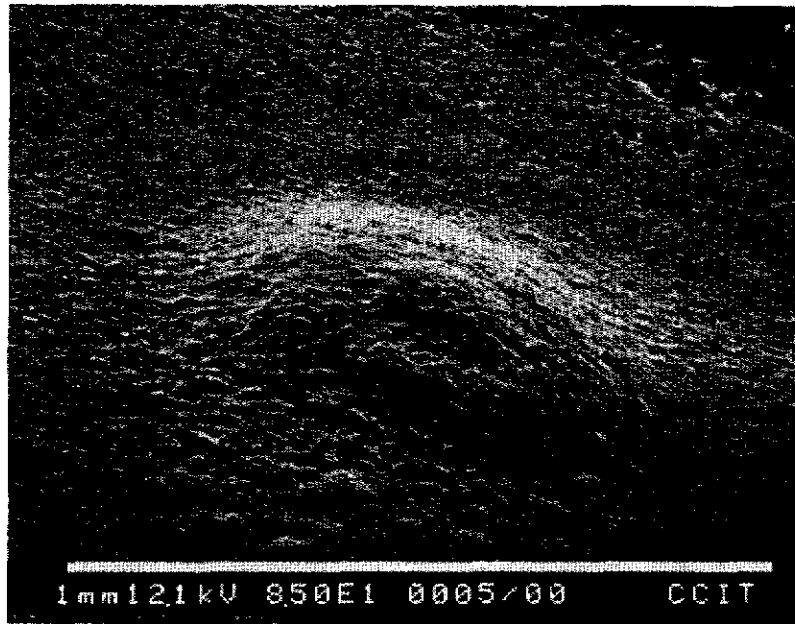


圖 3.7. 經  $2\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工過後的表面情況

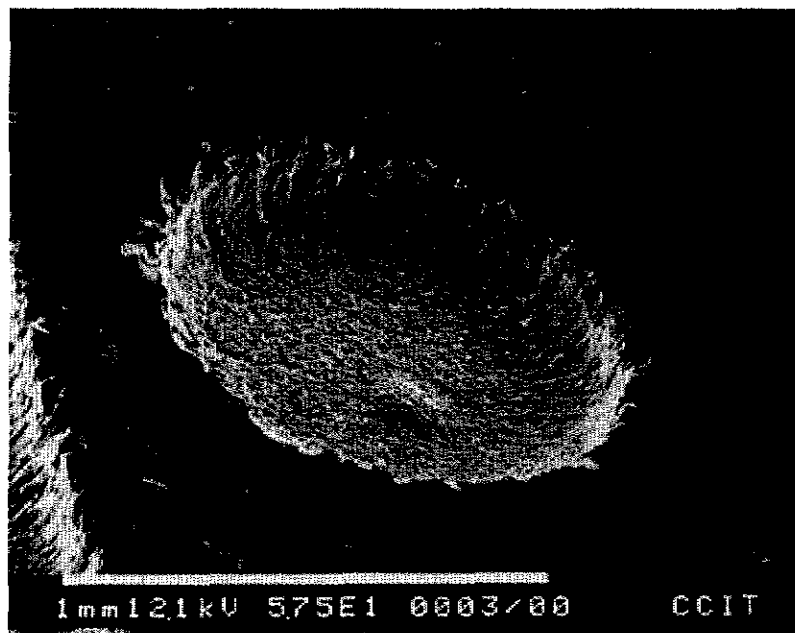


圖 3.8. 經  $2\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工過後表面邊緣的微裂



### 3.3.2 粗細磨粒間的關係：

	粗磨粒( $>5\ \mu\text{m}$ )	細磨粒( $<5\ \mu\text{m}$ )
優點	1.材料去除率高 2.可加工高深度的結構	1.加工後工件的表面粗度較佳 2.表面邊緣微裂較經微 3.加工精度較好 4.對刀具磨耗小
缺點	1.工件的表面粗度較差 2.表面邊緣微裂較嚴重 3.加工精度較差	1.材料去除率較低 2.無法加工高深度的結構

### 3.3.3 磨粒軟硬對超音波加工結果的影響：

一般超音波加工常用的磨粒依硬度大小排列為鑽石、碳化硼、碳化矽、氧化鋁等，硬度越大磨粒的磨耗越小，但對刀具磨耗也較嚴重，硬磨粒在加工時的材料移除率會較高，但加工時應依加工材料的硬度來選擇適當的加工磨粒，一般加工玻璃或石英材料多為碳化矽和氧化鋁，加工陶瓷材料時用碳化硼磨粒較為適當；本實驗採用碳化矽為主要加工磨粒，氧化鋁做為加工後的精拋用，用較軟的磨粒來拋光可提升工件的表面粗度。

### 3.3.4 磨料濃度對超音波加工結果的影響：

通常磨料是由水和磨粒所組成，也有用油當媒介的，本實驗以水為媒介，加工時因磨粒大小尺寸不同會造成刀具和工件之間的間隙不同，加工時磨粒流量也不盡相同，所以應依磨粒的大小和加工情況調

整磨粒濃度，顆粒大的磨粒在加工時濃度可以低點，顆粒小的磨粒濃度要高，否則加工困難，磨粒濃度提高可增加材料移除率，但濃度太高會造成流量不易進入加工區，反而會降低表面的粗度。實驗發現用  $60\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工時，濃度用 1:20 較適當，用  $5\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒加工時，濃度 1:20 反而顯得不足，用 1:10 較適當，用  $2\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒時濃度調 1:20，但因為太稀而無法加工，用 1:5 較適當，用  $0.3\mu\text{m}$  氧化鋁磨粒加工時，較適當的濃度為 1:3。

#### 3.3.5 刀具磨耗對超音波加工結果的影響：

加工刀具採剛性較好的不鏽鋼，加工速度越快刀具磨耗越嚴重，但因本超音波加工機屬固定垂直加工式，因垂直震盪所以刀具在施力或進給方向的磨耗較嚴重(受力大)，垂直於施力方向的磨耗較輕微，所以超音波加工非常適合加工深的微孔，且還能保持其精度，除了刀具會磨耗外，施力荷重太大也會造成刀具受力而發生折斷現象。

#### 3.3.6 工件形狀結構對超音波加工結果的影響：

由實驗得知超音波在做微加工時，適合加工凹面的結構如圖 3.9，如孔、槽等形狀，因為超音波垂直震盪，凹面的結構較容易成形，且容易加工出高深度的孔，若要加工凸面形狀的結構如圖 3.10，如柱、桿等則要小心，因為常容易因結構受力而發生彎曲折斷現象，在做凸面形狀加工的結構時，荷重不宜過大，太大會壓碎材料表面，如圖 3.11。

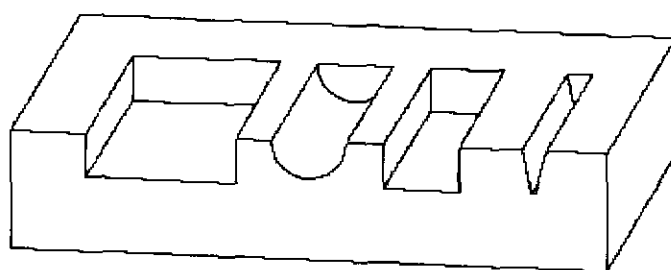


圖 3.9. 凹面結構的工件

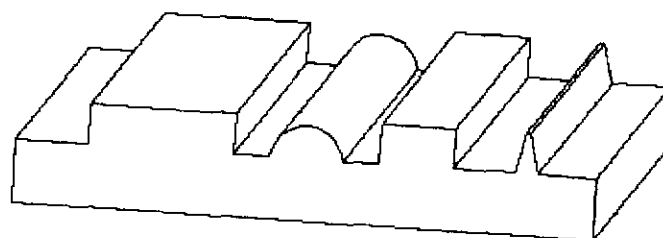


圖 3.10. 凸面結構的工件

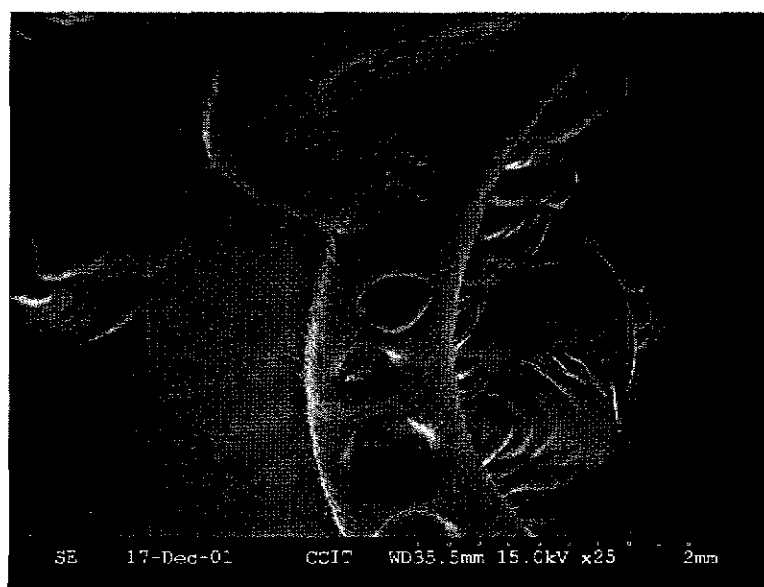


圖 3.11. 施加荷重過大，造成工件表面破裂

### 3.3.7 加工速率對超音波加工結果的影響：

本實驗用的超音波加工機是以荷重來控制加工速率，荷重越大加工速率越高，加工速率越快則材料的移除率越快，但對於刀具磨耗則較嚴重；加工速率越慢則材料的移除率越慢，但對工件的表面情況較佳，這是因為加工速率慢，磨粒會較有機會和工件接觸，容易將尖銳的角給磨平。粗磨粒加工下具有較大的加工速率，材料移除率較大，如  $60\mu\text{m}$  的碳化矽加工的進給率可達  $1\text{mm/min}$ ；細磨粒加工下的進給率就相對的變小，如  $5\mu\text{m}$  的碳化矽加工的最大進給率可達  $0.5\text{mm/min}$ ， $0.3\mu\text{m}$  的氧化鋁磨粒加工時僅可達  $0.2\text{mm/min}$ 。此外磨料濃度也會影響加工的速率，濃度越高速率越快，但加工時磨料濃度取決於磨粒的尺寸，不同大小的磨粒在加工時有其適合的濃度，濃度太低造成低的材料移除率，濃度過高則造成磨料的流動性不足，也會降低其加工效率和降低磨粒的壽命。

### 3.4 複合加工：

先用粗磨粒(碳化矽磨粒)粗加工至接近所需要的尺寸，在用細磨粒(氧化鋁磨粒)精拋到精確尺寸，如此可改善粗加工中表面粗度不佳的問題(圖 3.12)，且也解決了細磨粒加工時材料移除率低的缺點，但複合加工時刀具定位精度要注意，否則做微加工時，微結構常因為定位不準有位移而造成結構斷裂的問題(圖 3.13)。由實驗發現，加工玻璃時，第一段先用  $2\mu\text{m}$  的碳化矽磨粒粗加工，接著用  $0.3\mu\text{m}$  的氧化鋁磨粒精拋可達較好的效果。

複合加工：SiC  $2\mu$  (1:5) and  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $0.3\mu$  (1:3) 速度  $0.1(\text{mm/min})$   
但複合加工結果不理想，因機體本身精度問題、造成重複進給時會折斷微細

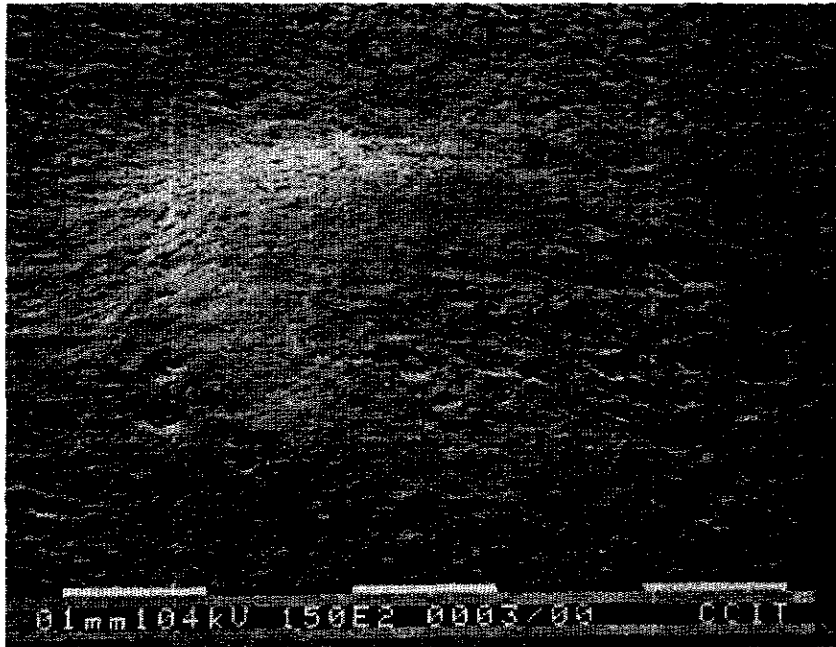


圖 3.12. 複合加工之表面形貌的結構



圖 3.13. 因定位不準造成結構斷裂

#### 3.4.1 刀具表面粗度對超音波加工的影響：

實驗發現超音波加工時刀具表面的情況也對加工結果造成影響，較好的刀具表面不一定加工出較好的結果，因為刀具表面也會受到磨粒的衝擊，光滑的表面第一次加工時會被磨粒衝擊得很粗糙，所以加工出工件的表面粗度會顯得較差，但第二次第三次以後粗糙的刀具表面在加工時會被磨粒給慢慢磨平，所以表面粗度會有所改善，但刀具的粗度受磨粒衝擊到一定的程度後，就不會再改變加工的結果了。例如刀具在未加工時粗度為  $0.2\ \mu\text{m}$ ，第一次加工後粗度變為  $0.7\ \mu\text{m}$ ，第二次加工後粗度變為  $0.58\ \mu\text{m}$ ，第三次加工後粗度變為  $0.47\ \mu\text{m}$ ，在多次加工後刀具的表面粗度就維持在  $0.4\ \mu\text{m}$  左右。

#### 3.4.2 工件的表面完整性

硬脆材料因其破壞模式和延性材料大不相同，脆性材料以破裂而非以變形來釋放能量，所以工件在經超音波加工後的表面邊角處會有些微的微破裂，如圖 3.14 為在  $5\ \mu\text{m}$  碳化矽磨粒加工時的結果，影響表面完整性最大的參數是磨粒的大小，材料受磨粒撞擊而移除，越大的磨粒就造成表面越嚴重的破壞，磨粒越小造成的損傷將越小，如圖 3.15。至於加工速度和磨料濃度對其影響較輕微。

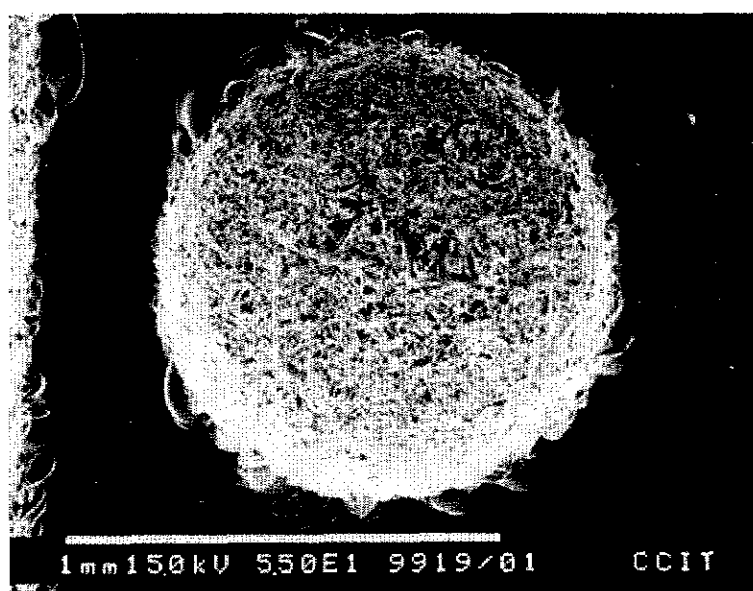


圖 3.14.  $5\mu\text{m}$  磨粒加工時造成表面邊角處較大的微破裂

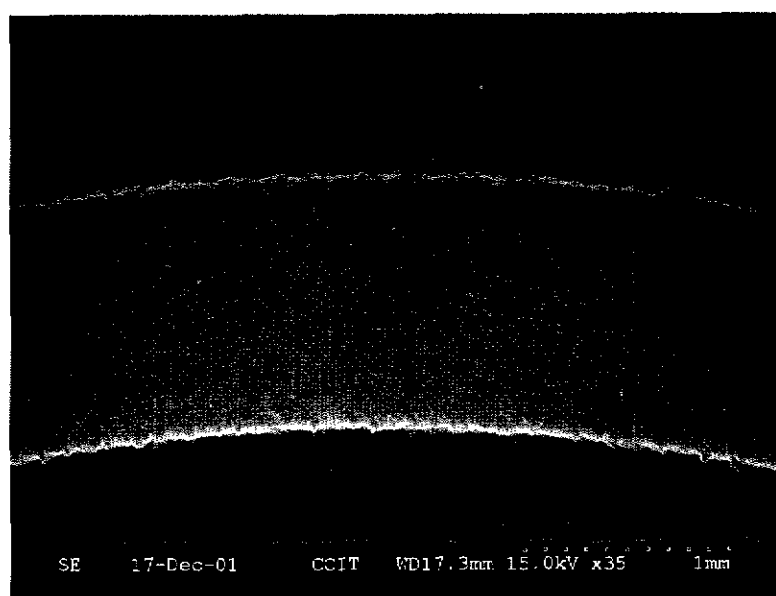


圖 3.15.  $2\mu\text{m}$  磨粒加工時表面邊角處較輕微的微破裂

### 3.4.3 空蝕現象(cavitation)

空蝕作用，即在磨料中無數氣泡快速形成並迅速內爆，如圖 3.16 中所示。

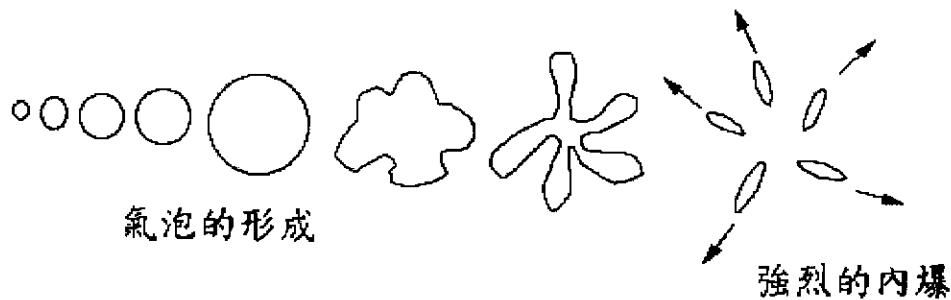


圖 3.16.氣泡的形成與內爆示意圖

由此產生的沖擊將對工件具微小的加工效果，也因其微小的加工將可改善工件的表面粗度。隨著超聲頻率的提高，氣泡數量增加而爆破沖擊力減弱，因此，高頻超聲不適合於微加工，特別適用於小顆粒污垢的清洗而不破壞其工件表面。超音波和其它聲波一樣，是一系列的壓力點，即一種壓縮和膨脹交替的波。如果聲能足夠強，液體在波的膨脹階段被推開，由此產生氣泡；而在波的壓縮階段，這些氣泡就在液體中瞬間爆裂或內爆，產生一種非常有效的沖擊力，特別適用於清洗。這個過程被稱做空化作用。從理論上分析，爆裂的空蝕泡會產生超過 10,000 psi 的壓力和 20,000 °F (11,000 °C) 的高溫，並在其爆

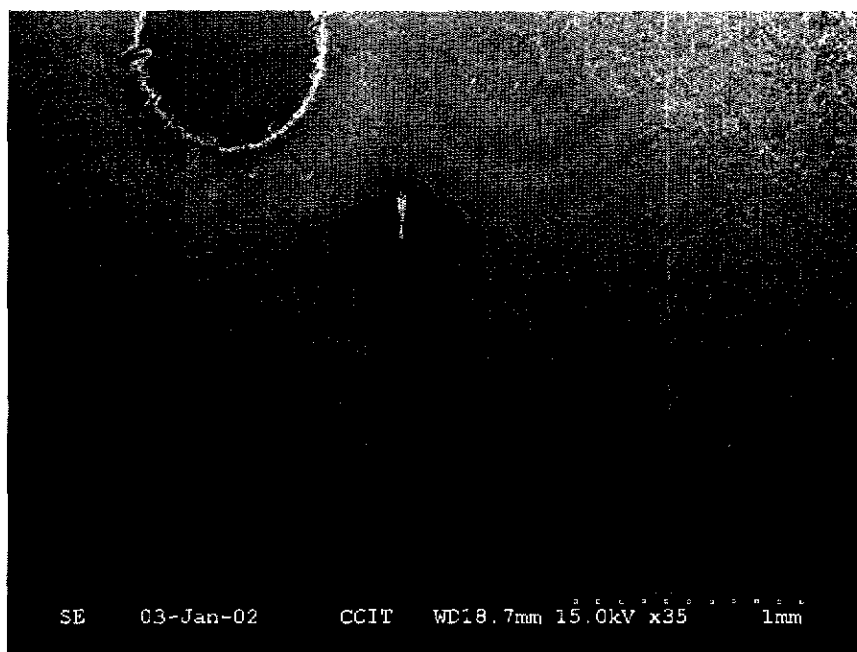


裂的瞬間沖擊波會迅速向外輻射。單個空蝕氣泡所釋放的能量很小，但每秒鐘內有幾百萬的空蝕氣泡同時爆裂，累計起來的效果將是非常強烈的，產生的強大的沖擊力將工件表面的材料進行微剝落，而達到微加工的效果。

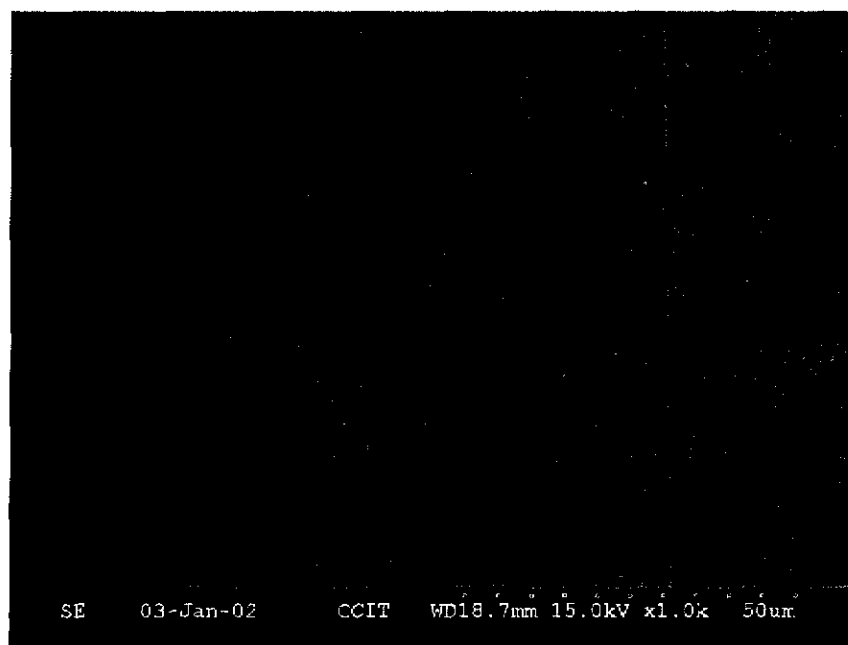
### 3.5 超音波加工三維結構

圖 3.17 為配合複合加工方式加工出的工件，本研究已能利用超音波加工出直徑小於  $100\ \mu\text{m}$  三維結構且其表面粗度  $R_a$  小於  $150\text{nm}$ ，工件可達半透光的程度。

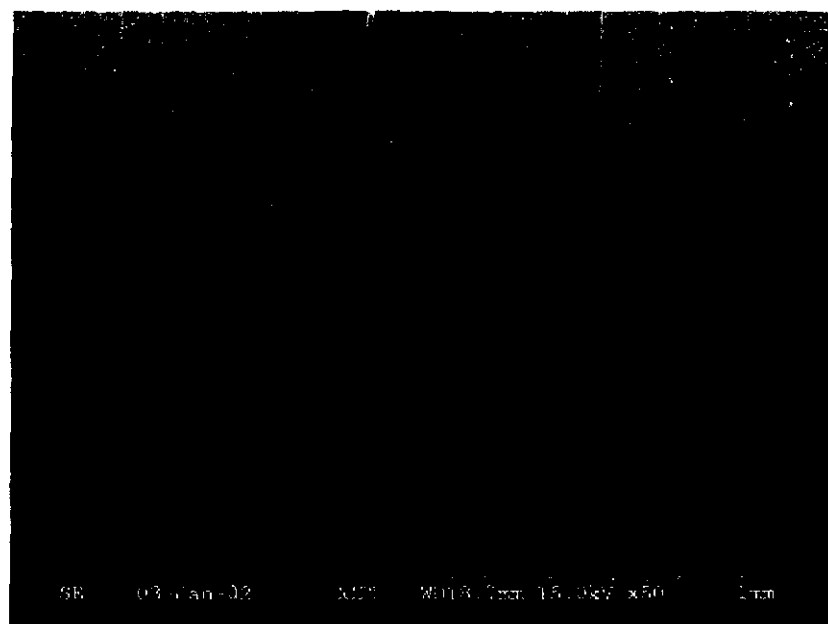
超音波加工適合加工細孔及深孔的結構，旋轉式超音波在此更優於固定式超音波，其材料移除率較高、刀具磨耗的相對較低，且加工後工件的表面粗度也較佳，但旋轉式超音波僅適合加工圓對稱性的形狀或結構，無法真正加工出三維的結構，必須仰賴於固定式超音波加工機，本實驗也順利的加工出三維造型的工件，如圖 3.18 及圖 3.19。而圖 3.20 中為多道次超音波加工中加工表面之改進情形由圖中清晰可見於粗加工之表面裂痕在後續之精加工中移除。但因限於刀具製作的困難，未來將嘗試製作更微細的三維刀具來進行超音波加工。



(a)

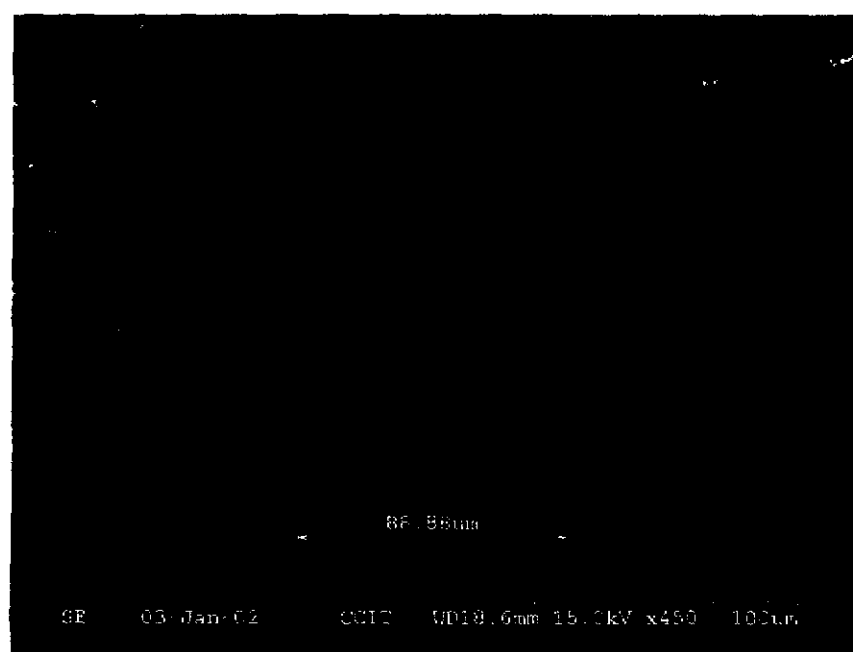


(b)

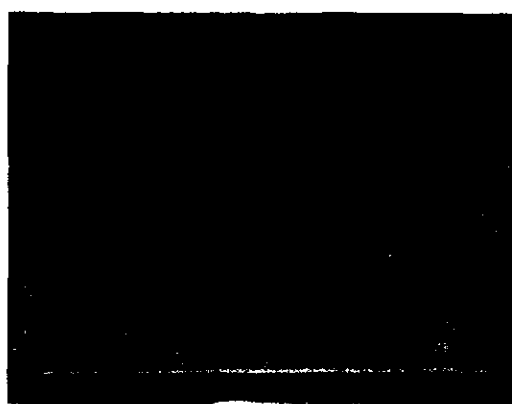


(c)

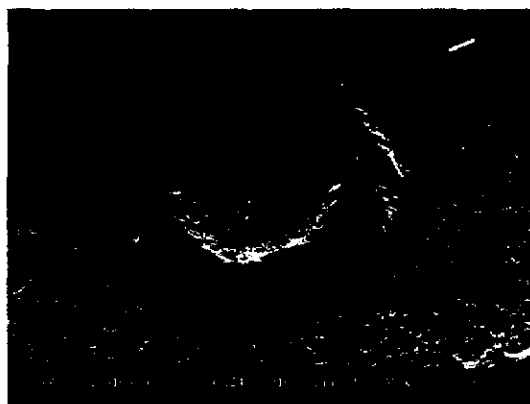
圖 3.17. 配合複合加工方式加工出的工件表面顯微圖片



(a)



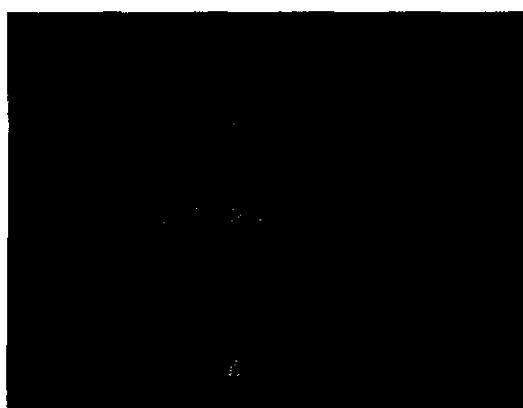
(b)



(c)

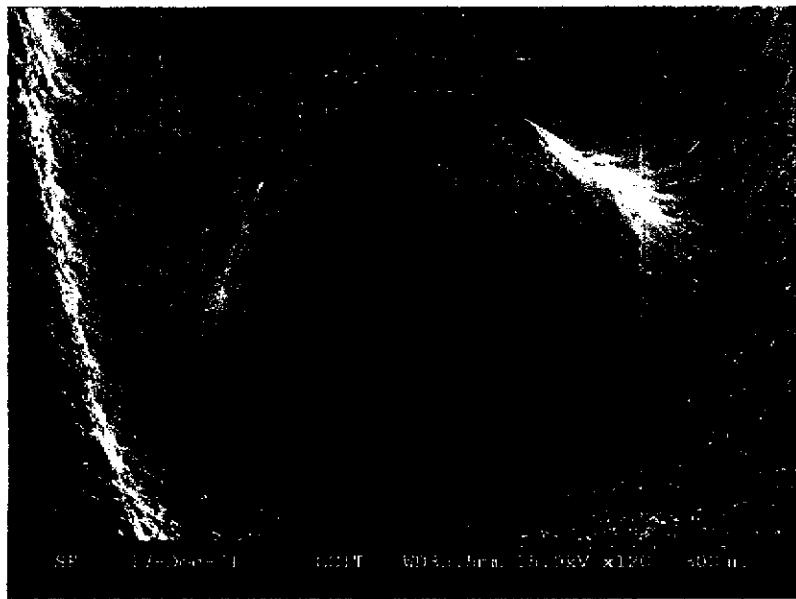


(d)



(e)

圖 3.18 本研究加工出三維造型的工件

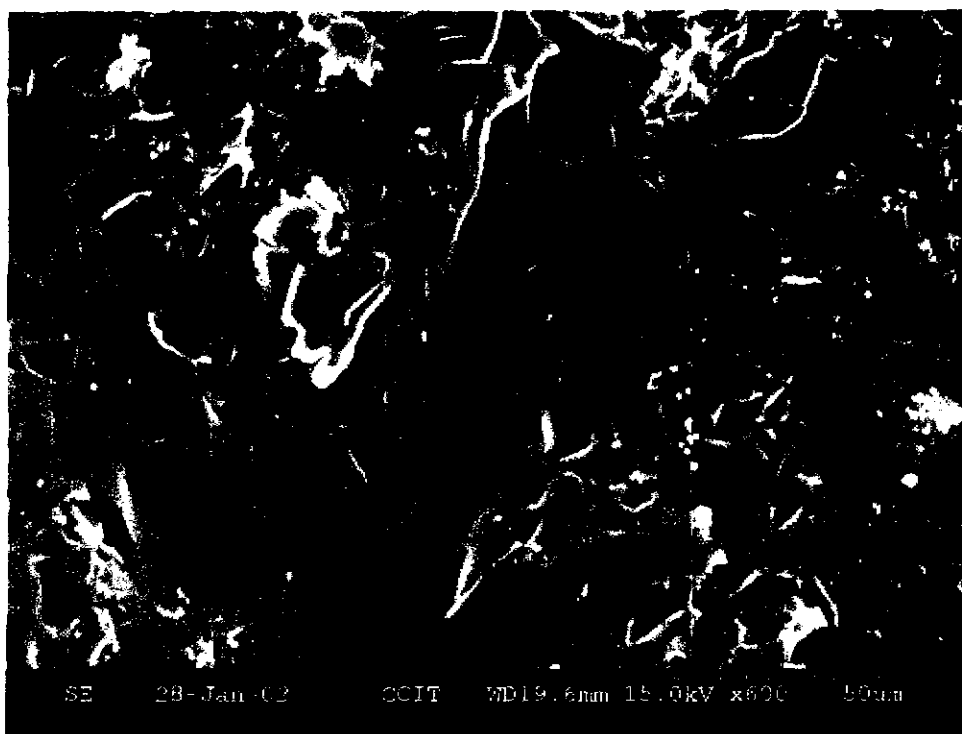


(a)

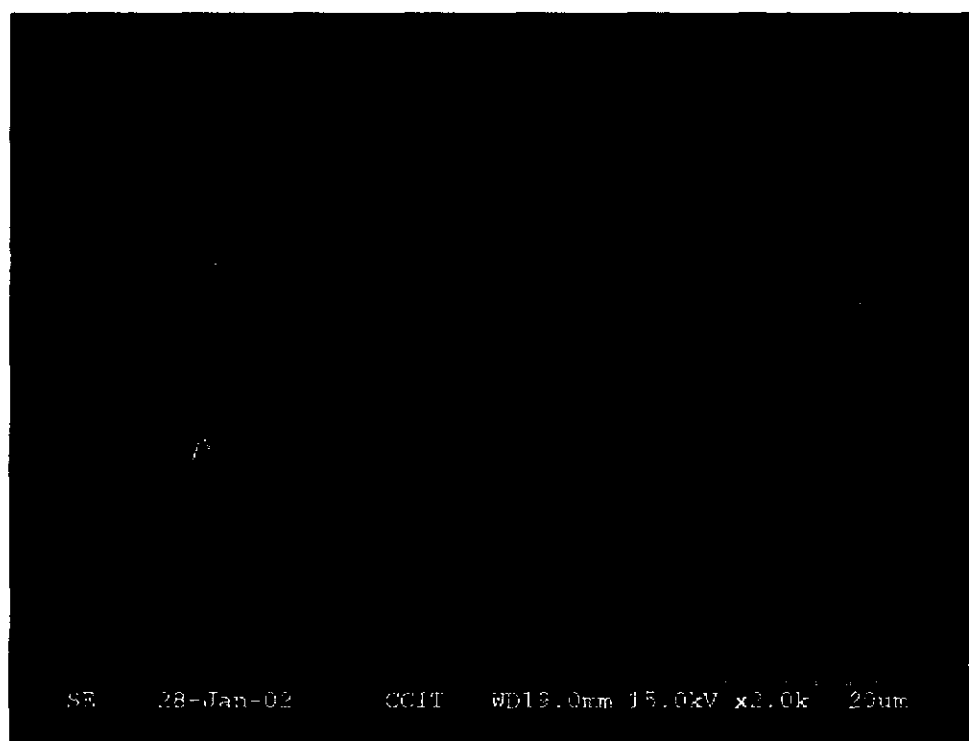


(b)

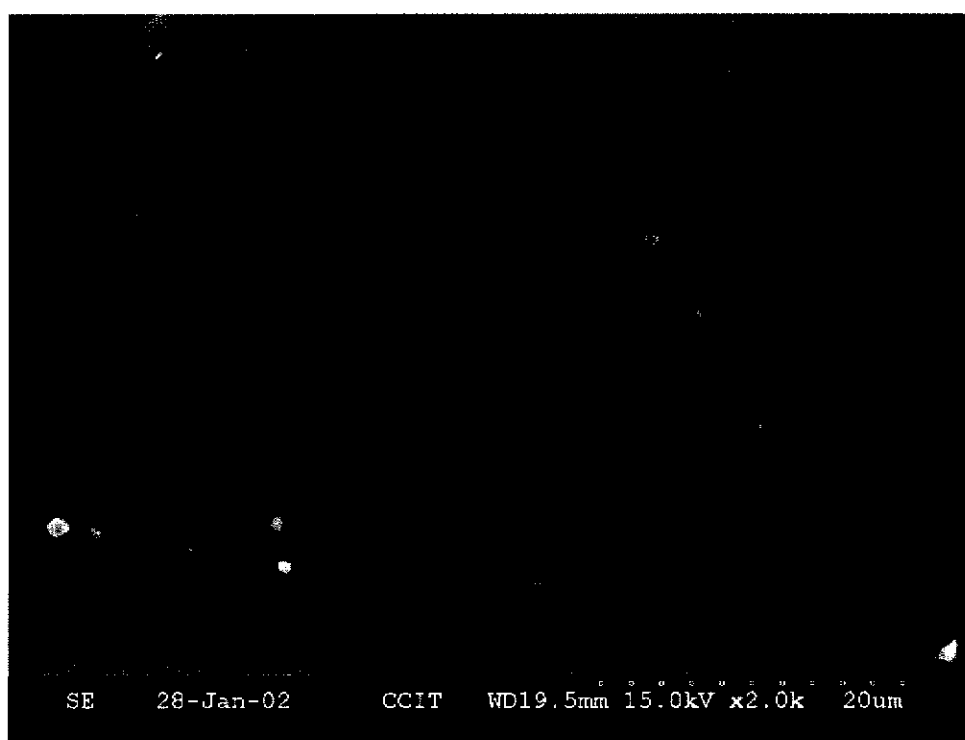
圖 3.19 .超音波加工出之三維結構細部放大顯微圖片



(a)



(b)



(c)

圖 3.20 多道次超音波加工中加工表面之改進情形顯微圖片

## 4. 結 論

- 一、若以壓痕實驗來模擬刀具磨粒的之衝擊加工時，刀具的振幅愈大(壓入負荷愈大)則所造成之裂痕、切屑碎片亦愈多；衝擊點愈密愈多則切屑碎片亦愈細碎；磨粒粒徑愈大(號數愈低)影響之範圍亦愈大。亦即，若只考慮加工效率時，超音波的振幅越大，磨粒粒徑愈大(號數愈低)，則加工效率越好，但加工面之粗度會較差。這是因為振幅提高也將提高刀具對加工物之加工應力，而造成大量脆性破壞，雖然提高加工效率但也使表面粗糙度變差。
- 二、一般而言，刀具磨粒號數越大（粒徑越小）者可維持較佳加工面之參數群越多；同一磨粒號數之下，振幅越小則脆性破壞面積越小而在同一磨粒號數及振幅之下，進給量越小則脆性破壞面積越小。
- 三、大進給率使衝擊深度過大進而使裂痕變深影響其表面粗糙度已於前述；而太小之進給會使加工時間大幅延長，如此不但加工效率相對降低且因加工時間加長會使刀具表面遭沖蝕的時間延長亦可使刀具之磨耗加大。
- 四、大進給率及較大之磨粒較易導致細孔入口表面上大面積之破裂。
- 五、磨粒粒徑愈大造成之衝擊亦愈大裂痕影響之範圍亦愈廣，高號



數(小磨粒粒徑)之表面粗糙度值(Ra 及 Rt 值)在其他加工條件相同時一般較低號數(大磨粒粒徑)要低。

六、刀具底部切削衝擊造成應力集中致使刀具的底部外緣衝擊磨耗得特別快。

七、由本研究發現複合加工之方式可有效於加工效率及表面粗糙度間獲取一平衡；先由大磨粒進行大量材料之移除及 3D 形狀之創成而後由高號數之細磨粒進行表面特性之改進。本研究利用超音波加工出直徑小於  $100\ \mu\text{m}$  之三維結構且其表面粗度 Ra 小於 100nm，已達半透光的程度。

八、Ishikawa 等人(1998)發展之於旋轉式超音波加工之振動外配合以工件低頻之震動，雖然在執行時會遭遇到超音波振動方向及工件低頻之震動方向對準之困難，但如此可將因超音波加工造成之切屑經由工件低頻震動間歇加大刀具與工件間間隙而得以有效的排出；使其切削力及孔徑能保持一致值得於往後之持續研究中發展運用。

九、在第一年中我們除完成微超音波加工之各項加工測試、不同種類及粒徑之磨粒加工時材料移除機制及加工表面之顯微結構探討分析；並發現欲獲致大移除量則磨粒必須用低號數(大粒徑)而欲得到好的表面特性(表面粗糙度佳、微裂痕少)則須採小進給、高號數(小粒徑)磨粒加工。但為增加加工效率及減少刀具磨耗第一年計畫中我們嘗試以多道次加工亦即是先以低號數磨粒大進給大震幅做粗加工創成輪廓繼之以小進給、高號數磨粒進行精加工以改進其表面粗糙度及顯微結構。但因目前中

科院所擁有之超音波加工機僅有軸向之運動控制無 x,y 兩軸之運動控制，亦無線上觀測工件及刀具用之設備且其 Z 軸之復現性(Repeatability)太差粗加工及精加工時常發生位置偏移。故為解決此一問題，本計畫擬在第二年之計畫中將現有之微超音波加工機進行精度改進性之實體細部設計、製作及加工測試，其工作細目包括有重新設計製作 Z 軸以改進其真直度誤差(Straightness error)、定位精度(Positioning accuracy) 及復現性(Repeatability) 使得多道次加工得以完成；改進 Z 軸之速度控制使進給率能更精準的調變；完成 x,y 兩軸平台之設計及運動控制使得加工可由單點而擴及面；改進磨料循環供給設備使能適合多道次加工中更換磨粒種類及粒徑之需求；此外上述之加工機本體改進亦必須配合以微超音波加工之各項加工測試及觀測分析以驗證其功能。且由於 Z 軸各項性能之改進後多道次加工中之精加工段可更往高號數之微粒推進以進一步改善加工表面。

## 5. 重要參考文獻

Atkins, A.G. & Tabor, D. 1965 J. Mech. Phys. Solids , Vol. 13, p149

Arora, A.; Marshall, D.B. & Lawn, B.R. 1979 J. Non-Crystal. Solids, Vol.31, p415

Auerbach, F. 1891 Ann. Phys. Chem., Vol.43, p61

Bishop, R.F. Hill, R. & Mott, N.F. 1945 Proc. Phys. Soc., Vol.57, p147

Bifano, T.G.; Dow, T.A. and Scattergood, R.O. 1988 "Ductile-regime Grinding of Brittle Materials", Proc. Conf. on Ultra-Precision in Manufacturing Engineering, Aachen, Germany

Chao, C.L.; Fang, C.M.; Chen, C.L.; Tsay, S.M. and Kuo, S.S. 1995 "Investigation of the Micro-Mechanical Properties of Various Brittle Materials using Micro-Indentation Technique", Proceedings of the 2nd Int. Abrasive Technology Conference (ABTEC-2), Hsin-Chu, Taiwan, 27-28 Nov., pp278-289

C.L. Chao, W.C. Lin and M.K. Ker 1997 "Material removal mechanisms and tool wear involved in rotary ultrasonic machining of brittle materials," ICPE '97 TAIPEI TAIWAN.

Cusumano, J.; Huber, J. and Marshall, K.T. 1974 "Ultrasonic Drilling of Boron Fiber Composites", Modern Plastics, No.6

Doutsu, T.; Lee, H.; Souma, K. and Hamazaki, K. 1990 “Development of the Advanced Ultrasonic Vibration Machining Technology for Fine Ceramics”, pp328-333

Finnie, I. 1958 “The Mechanism of Erosion of Ductile Metals”, Proc. 3<sup>rd</sup> National Congress on Applied Mechanics, ASME

Hashish, M. 1987 “An Improved Model of Erosion by Solid Particle Impact”, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. On Erosion by Liquid and Solid Impact (ELSI), Cambridge, UK, pp.66-1 to 66-9

Hertz, H. 1882 Verhandlungen des Vereins zur Beforderung des Gewerbefleisses, Leipzig, Nov. 1882 (English Translation: Miscellaneous Papers by H. Hertz, Eds. Jones and Schott, London: Macmillan, 1896)

Hill, R. 1950 The Mathematical Theory of Plasticity, Clarendon Press, Oxford

Hill, R.; Tupper, S.J. & Lee, E.H. 1947 Proc. Roy. Soc. A., Vol.188, p273

Ho, K.C.; Ker, M.K. and Lin, L.Y. 1994 “Investigation of Grinding Parameters in Ultrasonic Machining Zerodur Glass-Ceramics”, Proceedings of the 3<sup>rd</sup>. National Conference on Sci. and Tech. of National Defense, Nov., Taoyuan, Taiwan, R.O.C.

Ishikawa, K.; Suwabe, H.; Nishide, T. and Uneda, M. 1998 “A Study on Combined Vibration Drilling by Ultrasonic and Low-frequency Vibrations for Hard and Brittle Materials”, Precision Engineering, Vol.22, pp196-205.

Johnson, K. 1970 J. Mech. Phys. Solids, Vol.18, p115

Johnson, W. & Mellor, P.B. 1983 Engineering Plasticity, Ellis Horwood, Chichester, UK

Kingery, W.D.; Bowen, H.K. & Uhlmann, D.R. 1975 Introduction to Ceramics, 2nd ed., John Wiley, New York

Ker, M.K.; Hancock, P.H. and Stephenson, D.J. 1993 "Predicting the Grinding Behaviour of Engineering Ceramics", Proceedings of the 2nd National Conference on Sci. and Tech. of National Defense, Nov., Taoyuan, Taiwan, R.O.C., pp689-696

Kumabe, J. et al 1989 "Precision Drilling of Ceramics by Ultrasonic Superposition Vibration Cutting", J. of the Japan Soc. of Precision Engineering, Vol.55, No.2, p366

Komaraiah, M. et al 1988 "Investigation of Surface Roughness and Accuracy in Ultrasonic Machining", Precision Engineering, Vol.10, No.2, p59

Lee, T.C. & Chan, C.W. 1997 "Mechanism of the ultrasonic machining of ceramic composites," Journal of Materials Processing Technology

島川正憲 “超音波工學理論與實務” 賴耿陽譯

Moriwaki, T. and Shamoto, E. 1993 "Ultrasonic Ductile Cutting of Brittle Materials by Applying Ultrasonic Vibration" Proceedings of the 7th Int. Progress in Precision Eng., 17-21 May, Kobe, Japan, pp708-718

Moriwaki, T. and Shamoto, E. 1995 "Ultrasonic Vibration Cutting Applied to Ultraprecision Machining - A New Possibility for Ultraprecision Machining of Hard to Machine Materials" Proceedings of

the 8th Int. Progress in Precision Eng., May, Compiègne, France, pp298-301

Puttick, K.E.; Shahid, M.A. and Hosseini, M.M. 1979 *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, Vol.12, p195

Puttick, K.E. and Hosseini, M.M. 1980 *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, Vol.13, p875

Puttick, K.E.; Rudman, M.R.; Smith, K.J.; Franks, A. and Lindsey, K. 1989 "Single-Point Diamond Machining of Glasses", *Proc. Royal Soc. A*.426, pp19-30

Puttick, K.E. and K.J.; Franks 1990 "The Physics of Ductile-brittle Machining Transitions: Single-point Theory and Experiment", *JSPE* Vol. 56, No.5, pp788-792

Rozenberg, L.D.; Kazantsev, V.F.; Makarov, L.O. and Yakhimovich, D.F. 1964 "Ultrasonic Cutting", Consultants Bureau Enterprises, Inc., NY, USA

Schinker, M.G. and Doll, W. 1983 "Basic Investigations into the High Speed Processing of Optical Glasses with Diamond Tools", *SPIE*, Vol. 381, pp32-38

Schinker, M.G. and Doll, W. 1987 "Turning of Optical Glasses at Room Temperature", *SPIE* Vol. 802, pp70-80

Schott Glass Werke, "Zerodur - Precision from Glass Ceramics", Germany

Studman, C.J.; Moore, M.A. & Jones, S.E. 1977 *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol.10, p949

Swain, M.V. 1979 J. Amer. Ceram. Soc., Vol.62, No.5-6, p318

Swain, M.V. & Hagan, J.T. 1976 J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.9, p2201

Tabor, D. 1951 Hardness of Metals, Clarendon Press, Oxford

Ueda, K.; Amano, A.; Ogawa, K.; Takamatsu, H.; Sakuta, S.; Murai, S. and Kobayashi, A. 1991 "Machining High-Precision Mirrors Using Newly Developed CNC Machine", *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No.1, pp555-558

Umino, K.; Nishimura, K.; Minagawa, A. and Tomimori, H. 1986 "The Trial Construction of Ultrasonic Grinding Equipment and the Machining Characteristics - Study on High Efficient Grinding for Brittle Materials", J. of the Japan Soc. of Precision Engineering, Vol.52, No.1, pp107-113

Veldkamp, .D.B.; Hattu, N. and Snijder, V.A.C. 1978 "Fracture Mechanics of Ceramics, Vol.3 ", ed. R.C. Bradt; D.P.H. Hasselman and F.F. Lange, Plenum Press, New York, p273

王立江 1992 "超音波震動切削不分離區的三種狀態,"，中國科學，第三期。

Wang, H.M.S. and Lin, L.Y. 1993 "Improvement of Rotary Ultrasonic Deep Hole Drilling of Glass Ceramics-Zerodur" Proceedings of the 7th Int. Progress in Precision Eng., 17-21 May, Kobe, Japan, pp719-730